



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Diseño y realización de ensayos de lanzamiento de bloques de roca a escala reducida para el estudio de la fragmentación por conminución.

Trabajo realizado por:

**Ester Parras Sala**

Dirigido por:

**Gerard Matas Casado**

**Jose Antonio Gili Ripoll**

Máster en:

**Enginyeria del Terreny**

Barcelona, 14 de junio de 2019

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

## Resumen

La fragmentación condiciona la dinámica de los desprendimientos rocosos, influyendo en su energía de propagación y probabilidad de impacto. Sin embargo, no es habitual que los modelos de propagación incluyan la fragmentación. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de 92 ensayos a escala reducida, realizados en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) para estudiar el efecto del confinamiento en el proceso de fragmentación. Se han dejado caer adoquines desde una altura de 4.26 m, de forma individual y en apilamientos de tres y cinco adoquines. Posteriormente, se han inventariado los fragmentos resultantes y se han elaborado curvas granulométricas en función del número de fragmentos y el volumen máximo. Los datos obtenidos indican un mayor número de fragmentos y un menor volumen máximo para los adoquines sometidos a más confinamiento en el momento de impacto.

## Resum

La fragmentació condiciona la dinàmica dels desprendiments de roca, influenciant en la seva energia de propagació i probabilitat d'impacte. No obstant, no es habitual que els models de propagació incloguin la fragmentació. En aquest treball es presenten els resultats obtinguts de 92 assajos a escala reduïda, realitzats en el laboratori de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) per estudiar l'efecte del confinament en el procés de fragmentació. S'han deixat caure llambordins des de una alçada de 4.26 m, de forma individual i en apilaments de tres i cinc llambordins. Posteriorment, s'han inventariat els fragments resultants i s'han elaborat corbes granulomètriques en funció del número de fragments i el volum màxim. Les dades obtingudes indiquen un major número de fragments i un menor volum màxim per els llambordins sotmesos a més confinament en el moment d'impacte.

## Abstract

Fragmentation conditions the dynamics of rockfalls, influencing their energy of propagation and probability of impact. However, it is not usual for propagation models to include fragmentation. This paper presents the results obtained from 92 tests on a reduced scale, carried out in the laboratory of the Polytechnic University of Catalonia (UPC) to study the effect of confinement on the fragmentation process. Cobblestones

have been dropped from a height of 4.26 m, individually and in columns of three and five cobblestone. Subsequently, the resulting fragments have been inventoried and granulometric curves have been developed according to the number of fragments and the maximum value. The data obtained reflects a greater number of fragments and lower maximum volume for the cobblestone subjected to more confinement at the moment of impact.

# Índice

<b>1. Introducción .....</b>	<b>6</b>
1.1 Antecedentes y motivación .....	6
1.2 Objetivos .....	9
1.3 Estructura del trabajo .....	9
<b>2. Desprendimientos rocosos (estado del arte) .....</b>	<b>11</b>
2.1 Susceptibilidad, Peligrosidad y Riesgo. ....	11
2.1.1 Análisis de riesgo cuantitativo (QRA) .....	13
2.2 Fragmentación en RockRisk y RockModels .....	16
2.2.1 In situ Block Size Distribution (IBSD) y Rockfall Block Size Distribution (RBSD) .....	18
2.2.2 Aplicación Modelos de propagación en RockRisk y RockModels .....	20
2.3 Estudio y caracterización vía ensayos (escala real y escala reducida) .....	24
<b>3. Diseño y desarrollo de ensayos a escala reducida .....</b>	<b>34</b>
3.1 Diseño experimental .....	34
3.1.1 Material ensayado .....	35
3.1.2 Montaje general del ensayo .....	38
3.2 Realización de los ensayos .....	43
<b>4. Resultados .....</b>	<b>52</b>
4.1 Granulometrías .....	52
4.1.1 Tamizado .....	53
4.1.2 Clasificación .....	54
4.1.3 Medida .....	55
4.2 Curvas granulométricas resultantes .....	57
4.2.1 Lanzamientos Individuales .....	57
4.2.2 Lanzamientos de 3 adoquines .....	59
4.2.3 Lanzamientos de 5 adoquines .....	60
4.3 Otros resultados post-ensayo .....	63
<b>5. Análisis y discusión de resultados .....</b>	<b>65</b>
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>72</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>76</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>79</b>



## *Agradecimientos*

Quiero agradecer especialmente a mis tutores, Gerard Matas y Josep Gili, la amabilidad y dedicación recibida durante todo el transcurso de este trabajo. Desde el primer día, me han facilitado y enseñado todo lo que estaba en su mano para que este trabajo fuera un medio de aprendizaje.

Me gustaría agradecer a todo el equipo del proyecto RockModels, financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España (Ref. BIA2016-75668-PAEI/FEDER, UE) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), por brindarme la oportunidad de aprender de grandes profesionales e introducirme en el mundo de los riesgos geológicos, que sin duda es fascinante. Gracias a Roger por orientarme durante el trabajo, a Nieves por ayudarme y responder siempre a todas mis preguntas y a Albert, Amparo, Càrol, Corominas, Felipe y Moya por su apoyo durante los tres días realización de los ensayos en el laboratorio.

También, agradecer a todo el personal de los laboratorios de Tecnología de Estructuras y de mecánica de suelos de la UPC, por facilitarnos las instalaciones y la maquinaria necesaria para el desarrollo del trabajo. En especial a Rodrigo y a Arisleidy por su afabilidad.

Por último, quiero agradecer a mi familia, pareja y amigos por recordarme siempre que, con esfuerzo e interés, los caminos que a veces parecen más difíciles se consiguen y, además, son los más satisfactorios.

# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes y motivación

Los desprendimientos de roca se definen como la separación de un volumen de roca por deslizamiento, vuelco o caída de un escarpe vertical o subvertical. Los bloques y/o fragmentos de roca se propagan por rebote y vuelo siguiendo trayectorias balísticas o de rodadura (Varnes, 1978). Es un fenómeno breve y espontáneo que supone un grave problema a nivel mundial para las poblaciones cercanas a áreas montañosas (Figura 1).

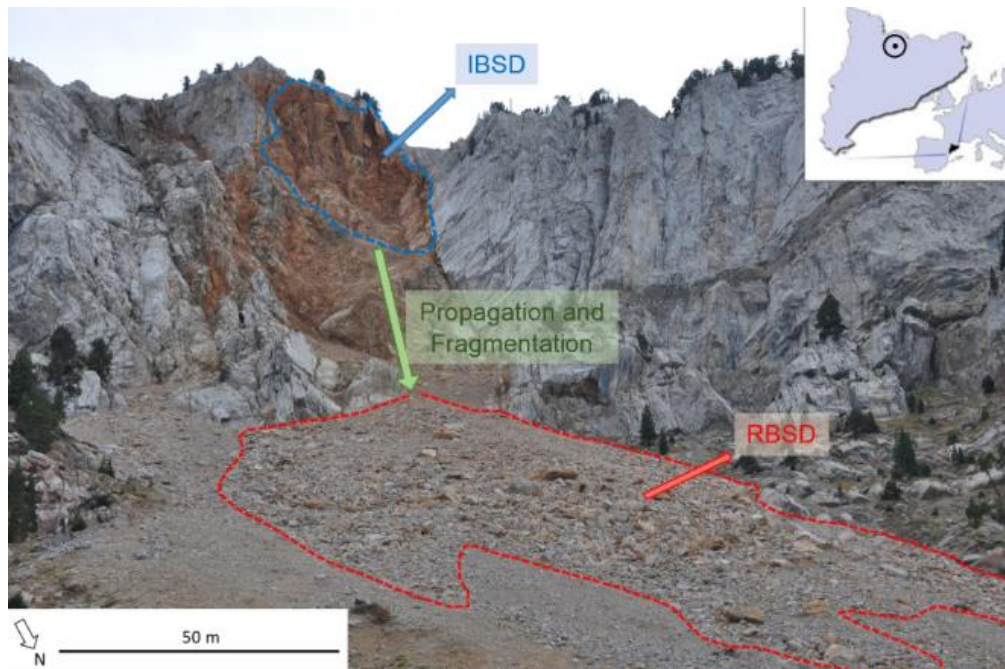


**Figura 1.** Desprendimiento en la carretera LV-9124, Castell de Mur (Bomberos de la Generalitat, 2018)

Para determinar la vulnerabilidad de las infraestructuras frente a estos procesos naturales no es suficiente estimar el punto de impacto de caída de los bloques, sino que también hay que determinar su intensidad. La energía depende de la velocidad y de la masa de los bloques de roca. Cuando un bloque impacta sobre el suelo, se puede producir una conminución, es decir, que la roca se rompa en fragmentos más pequeños. El grado de fragmentación depende del patrón de fracturación del macizo rocoso, la orientación y persistencia de las juntas, la resistencia entre matriz y juntas, la rigidez del terreno, y de la energía y ángulo de impacto (Chau et al 2002; Wang y Tonon, 2011). El estudio de la fragmentación es un análisis complejo pero esencial ya que influye, por un lado, disminuyendo la energía cinética (menos tamaño de roca, menos alcance) y, por otro lado,

aumentando la probabilidad de impacto (cuanto mayor número de fragmentos, mayor número de impactos). En la actualidad, cuando se realizan análisis de peligrosidad generalmente no se considera el mecanismo de conminución, hecho que genera una sobrestimación de los resultados.

Para el estudio de estos procesos es imprescindible la caracterización de la zona de estudio (Figura 2) con el mayor nivel de detalle posible y la máxima calidad de los datos. La zona de estudio se divide en tres secciones: rotura, tránsito y deposición (Dorren, et al.2011). En la zona de rotura el análisis consiste principalmente en la caracterización de las discontinuidades (In situ Block Size Distribution, IBSD), la cual nos permite estimar el volumen de rotura potencial y cuantificar las discontinuidades. En las zonas de tránsito y deposición, se realizan inventarios de las distribuciones de los volúmenes de roca desprendidos (Rockfall Block Size Distribution, RBSD). Una vez caracterizada la zona, pueden realizar ensayos a escala real para obtener los parámetros que permiten la calibración y validación del modelo.



**Figura 2.** Desprendimiento de roca Sierra del Cadí, cerca de Vilanova de Banat (Ruiz-Carulla, 2015)

Los análisis con modelos de propagación 3D permiten calcular la trayectoria de cada fragmento por separado (Volkwein et al. 2011). Esto es importante ya que cuando un bloque de roca impacta sobre el terreno, los fragmentos proyectados siguen trayectorias independientes sin apenas interaccionar entre ellos (Evans y Hungr, 1993). Los proyectos RockRisk (2014-2016) y RockModels (2016-act) han surgido de la necesidad de entender e integrar la fragmentación en los modelos de análisis y prevención de desprendimientos rocosos. El proyecto RockModels ha elaborado un modelo de propagación de desprendimientos fragmentarios basado en el modelo de fragmentación fractal (Ruiz-Carulla, 2015), en el inventario de desprendimientos y en una serie de ensayos a escala real (Gili et al. 2016). El modelo ha integrado los modelos numéricos de propagación (útiles a nivel regional o local) a un GIS para realizar análisis en 3D. Se ha creado la aplicación RockGIS (Matas et al. 2016) que tiene en cuenta el volumen de fragmentación y la divergencia en las trayectorias, las cuales afectan directamente a la intensidad y probabilidad de impacto y, por lo tanto, al riesgo.

Este trabajo surge de la necesidad de analizar la contribución de las juntas y/o puentes de roca en la conminución de los bloques de roca. Tal es la hipótesis que se quiere comprobar: al caer un bloque fracturado, la parte del bloque que cae primero no solo impacta directamente con el terreno, sino que además recibe un impacto de los fragmentos que están por encima. Para estudiar este hecho se han realizado ensayos a escala reducida con apilamientos de adoquines, simulando la conminución de rocas reales. Estos ensayos han proporcionado eventos de fragmentación que han sido posteriormente analizados en el laboratorio. El análisis se ha centrado en la obtención de curvas granulométricas muy detalladas, utilizando un sistema de captación semiautomático que representa un avance en la cuantificación de la RBSD.

## 1.2 Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo general observar y analizar la influencia del confinamiento en los patrones de fragmentación durante el proceso de conminución de un desprendimiento de roca. En concreto, se trata de confirmar experimentalmente si los bloques inferiores se rompen en mayor número de fragmentos y de inferior tamaño, por el impacto añadido de la masa que se encuentra por encima.

Para ello, se han marcado los siguientes objetivos parciales:

- Simular el mecanismo de conminución de bloques mediante la realización de ensayos a escala reducida.
- Analizar, tras los ensayos, la influencia del ángulo y del confinamiento de los bloques en el momento del impacto. Para ello se visualizarán los videos de alta velocidad.
- Obtener y analizar el número y volumen máximo de fragmentos utilizando un sistema de captación semiautomático, que permitirá elaborar curvas granulométricas de los ensayos de conminución.

## 1.3 Estructura del trabajo

El trabajo que se presenta a continuación se estructura en seis capítulos. El capítulo 1 remite al apartado de la introducción y objetivos, expuesto anteriormente.

En el capítulo 2 “Desprendimientos rocosos, estado del arte” se definen los términos de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, y se describen los factores condicionantes en los análisis de riesgo cuantitativos. Por un lado, se expone el marco conceptual de la fragmentación desde el punto de vista de los Proyectos RockRisk y RockModels y, por

otro lado, mediante la descripción de ensayos a escala real y reducida se realiza un recorrido bibliográfico.

El capítulo 3 “Diseño y desarrollo de ensayos a escala reducida” expone qué estructuras y materiales han sido necesarios para llevar a cabo los ensayos. En este apartado se describe la función de cada elemento estructural y se indica toda la instrumentación utilizada en el registro de datos.

El capítulo 4 “Resultados” reúne el procesamiento de datos, la elaboración de curvas granulométricas y otros resultados paralelos obtenidos de los ensayos de conminución. Se explica el sistema de captación semiautomático que ha permitido la obtención de curvas granulométricas para cada ensayo, en términos de números de fragmentos y volúmenes máximos. También, se expone el método de cálculo de ángulos de impactos y el sistema de modelización 3D de los depósitos.

El capítulo 5 “Análisis de resultados” se estudia el comportamiento de un mismo tipo de muestra en los tres lanzamientos distintos y se examinan gráficos estadísticos comparativos del número de fragmentos y volúmenes máximos de todos los ensayos procesados.

El capítulo 6 “Conclusiones y líneas abiertas” recoge las proposiciones obtenidas en este trabajo. Por último, se exponen las futuras vías de investigación abiertas en el estudio de la incorporación de la fragmentación en los modelos de propagación.

## 2. Desprendimientos rocosos (estado del arte)

### 2.1 Susceptibilidad, Peligrosidad y Riesgo.

Los desprendimientos de roca son procesos naturales que ocurren en regiones de montaña, zonas de costa rocosas y en cambios de pendiente (Corominas & Mavrouli, 2011). El creciente proceso de urbanización en estas zonas ha generado la necesidad de desarrollar medidas de predicción y prevención basadas en evaluaciones cuantitativas y/o cualitativas. Las evaluaciones cuantitativas pueden obtenerse de datos absolutos (estadísticos o matemáticos) y/o de datos relativos (empíricos). No ocurre lo mismo con las evaluaciones cualitativas, que se basan únicamente en datos empíricos. La disponibilidad y realización de inventarios es esencial para cualquier tipo de análisis. La validez de los resultados viene determinada por la disponibilidad, calidad y clasificación de los datos utilizados en el análisis

En el estudio de los procesos naturales, como los desprendimientos de roca, el tamaño de la zona condiciona el tipo de evaluación a seguir. En zonas específicas, donde se obtienen más datos y de mejor precisión, es adecuado realizar un análisis de peligrosidad y de riesgo. Al contrario, ocurre en zonas más extensas, las cuales son más difíciles de caracterizar y se opta por un análisis de susceptibilidad.

La tabla 1 (Fell, 2008) muestra que tipo de análisis a optar en función de la escala y el nivel de detalle. Cada tipo de análisis se complementa entre sí, siendo el de riesgo el más completo. Los datos obtenidos se representan en mapas, utilizando programas muy eficaces de análisis espacial como por ejemplo GIS. La representación en mapas facilita significativamente la gestión y visualización de los datos.

**Tabla 1.** Tipo de análisis en función del nivel de detalle y la escala de un estudio de desprendimientos. (Fell,2008).

Escala	Nivel de detalle		
	Preliminar	Intermedio	Avanzado
Regional	Susceptibilidad	(Peligrosidad)	
Local	Susceptibilidad	Peligrosidad	(Riesgo)
Específica		Peligrosidad	Riesgo

( ) = puede ser aplicable.

Los mapas de susceptibilidad indican la clasificación, localización y área de procesos que están ocurriendo o que pueden ocurrir en una zona. Se basan en la relación de los factores de predisposición y factores desencadenantes que dan lugar a un desprendimiento de roca (Tabla 2). En los análisis cuantitativos, los datos relativos se obtienen de la caracterización geomecánica (SMR, RMS), y los datos absolutos son proporcionados por modelos de estabilidad.

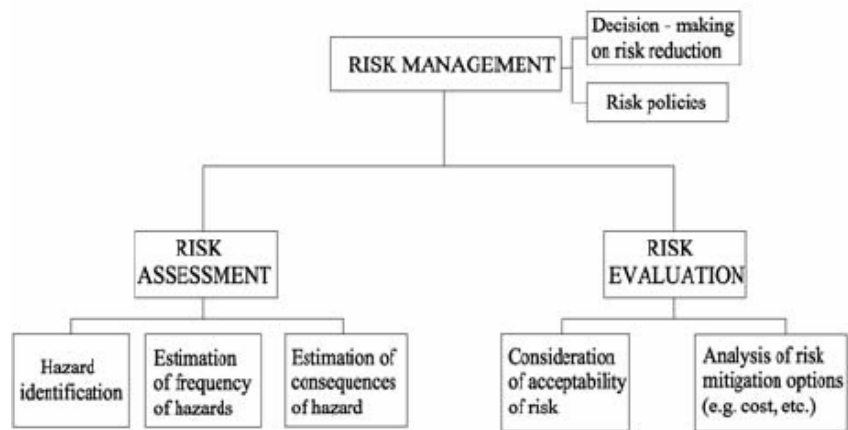
**Tabla 2.** Factores de predisposición y desencadenantes en desprendimientos de roca.

<b>Factores de predisposición</b>	Discontinuidades (orientación, inclinación, espaciamiento, persistencia, cohesión, ángulo de fricción).
<b>Factores desencadenantes</b>	Precipitaciones, Sismos, Hielo

Los mapas de Peligrosidad son los más utilizados para planificar los usos del suelo e indican la probabilidad anual (frecuencia) del fenómeno y su magnitud/intensidad. La peligrosidad se define como la probabilidad asociada a un fenómeno con una intensidad concreta, la cual hace referencia a la velocidad (Cruden, Varnes 1996), el volumen (Fell 1994) y a la energía cinética (Sassa 1988).

Cuando existe la posibilidad de daño hacia personas o bienes es necesario realizar un análisis de riesgo. Los mapas de riesgo complementan a los análisis de peligrosidad, incorporando el análisis de las consecuencias (exposición y vulnerabilidad). El riesgo se define como “la probabilidad y la gravedad de un efecto adverso hacia la salud, propiedad o ambiente” (Corominas, 2011). En la Figura 3 se muestran los puntos clave a resolver en los análisis de riesgo (Ho et al. 2000).





**Figura 3.** Flujo de trabajo análisis y gestión de riesgo (modificado de Ho et al.2000)

La primera y más simplificada ecuación de riesgo (E.1) fue formulada por Varnes (1984) y define el riesgo como producto de la peligrosidad y vulnerabilidad a los elementos expuestos.

$$R = (P \cdot V) \cdot E \quad (E.1)$$

Donde P es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de intensidad y magnitud determinada en una zona específica y en un periodo de tiempo limitado; V, es el grado de predisposición o vulnerabilidad de un elemento a sufrir daños de un proceso natural de magnitud determinada; E, es la exposición de los elementos al riesgo

### 2.1.1 Análisis de riesgo cuantitativo (QRA)

Los análisis de riesgo cuantitativo (QRA) consisten en la obtención de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno y la evaluación de sus consecuencias. En los QRA se introducen parámetros que permiten reproducir y analizar diferentes escenarios. La obtención de estos parámetros no siempre es fácil ya que depende de muchos factores, ya sean de la caracterización del área fuente como de la dinámica de los volúmenes de roca desprendidos.

Los resultados de los análisis de riesgo cuantitativo se caracterizan por cumplir los criterios regulados y ser comparables entre diferentes escenarios o zonas de estudio. Para representar la ocurrencia en función del volumen de roca desprendido se elaboran curvas de magnitud-frecuencia regidas por leyes estadísticas de distribución. Para su correcta elaboración es muy importante disponer de un buen inventario de registros anteriores y realizar ensayos experimentales.

La E.2 (Agliardi et al. 2009) muestra como el riesgo total (en términos de probabilidad) se obtiene a partir del cálculo de factores de riesgo parciales. Los volúmenes de roca deben estudiarse por separado, ya que cada rango de magnitud (i) tiene una frecuencia, trayectoria y energía cinética determinada. El cambio de magnitud (volumen) influye directamente en la vulnerabilidad de los elementos expuestos (j).

$$R = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I N_i \cdot P(X/D)_i \cdot P(T/X)_j \cdot V_{ij} \quad (E.2)$$

Donde;

**R:** Riesgo por desprendimiento de un bloque de roca de magnitud  $i$  a un elemento expuesto  $j$  y a una distancia de la cabecera  $x$

**$N_i$ :** Frecuencia anual de desprendimiento de roca de magnitud  $i$

**$P(X/D)_i$ :** Probabilidad de que el desprendimiento de roca de magnitud  $i$  alcance un punto a una distancia  $x$

**$P(T/X)_j$ :** Probabilidad espacio- temporal de que un elemento expuesto  $j$  se encuentre a una distancia  $x$

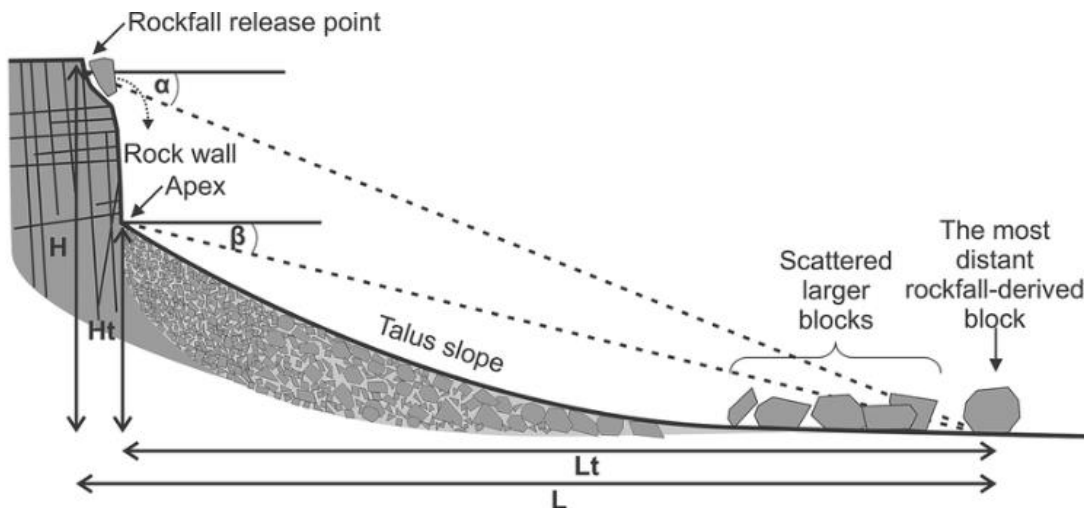
**$V_{ij}$ :** Vulnerabilidad/daño de un elemento expuesto  $j$  a ser impactado por un desprendimiento de roca de magnitud  $i$ .

Un ejemplo reciente en el que se evalúan estos términos para un caso real es Corominas et al. (2018). El análisis de riesgo cuantitativo se realizó en el Monasterio de Piedra (España) para analizar cómo la fragmentación en desprendimientos afecta al QRA.

La ley potencial más aceptada para el cálculo de la frecuencia anual de desprendimientos  $N_i$  es la E.3 (Hungr 1999; Dussauge 2002; Guzzetti 2003), que permite calcular el número de desprendimientos por año  $n(V)$  a partir del volumen  $V$  y de las variables  $b$  (independiente del contexto geológico) y  $\lambda$  (dependiente del contexto geológico).

$$n(V) = \lambda \cdot V^{-b} \quad (E.3)$$

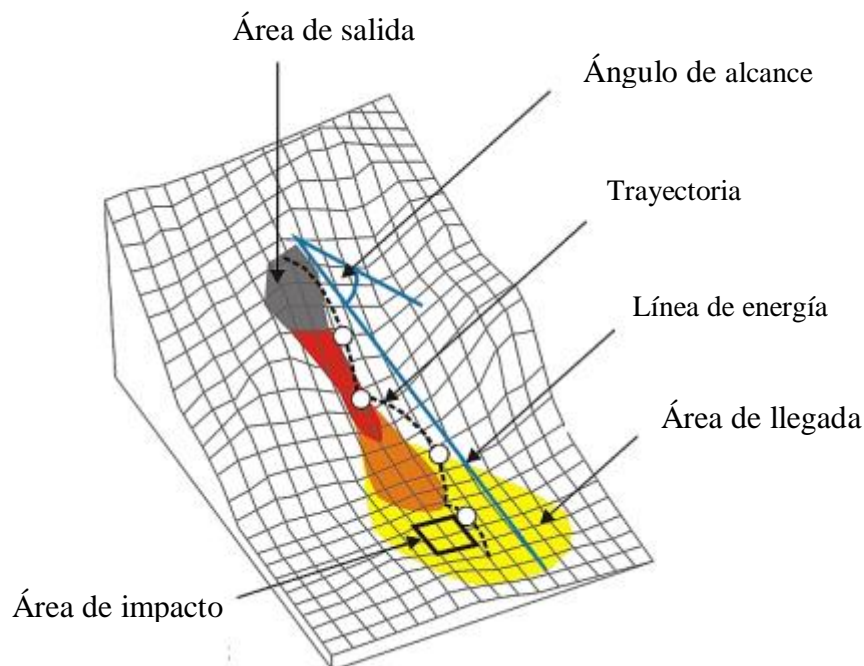
Para determinar la probabilidad de alcance del evento  $P(X/D)_i$  se realizan modelos de propagación. Los modelos de propagación relacionan las trayectorias de los bloques de roca con las características morfológicas del talud y el volumen de roca desprendido. En la Figura 2 se representan los ángulos de alcance ( $\alpha$ ) y de sombra ( $\beta$ ), y también se indican las características morfológicas como la altura total ( $H$ ), la longitud total ( $L$ ), la altura de caída ( $H_t$ ) y longitud ( $L_t$ ) desde el pie de la pared rocosa. El ángulo de alcance (Sch, 1973) está definido por la zona de rotura o cabecera y por la máxima distancia a pie de talud a la que se encuentran los depósitos de roca; y el ángulo de sombra (Eva 1993) está definido por la zona en la que los bloques de roca siguen comportamientos de rebote o de rodadura.



**Figura 2.** Perfil longitudinal de un escarpe con desprendimientos de roca (modificado, a partir de Copons et al.2009).

## 2.2 Fragmentación en RockRisk y RockModels

Los desprendimientos de roca fragmentarios fueron definidos y diferenciados de los fenómenos de avalanchas rocosas por Evans y Hungr (1993) y Hungr et al. (2014). Los autores defienden que cada fragmento actúa como un cuerpo rígido y sigue una trayectoria independiente, impactando episódicamente con el terreno. Cuando un bloque de roca impacta sobre el terreno, una parte de la energía que procede del volumen de roca inicial se transmite a los fragmentos generados. Cada fragmento creado tendrá un volumen, energía cinética y una trayectoria que determinará la velocidad, altura y posición de impacto (Figura 4).



**Figura 4.** Parámetros generales de los desprendimientos de roca fragmentarios. (modificado, a partir de Jaboyedoff et al., 2001)

No incluir la fragmentación produce una sobrestimación de la energía cinética y de las trayectorias (Okura et al. 2000; Dorren 2003) y una subestimación de la frecuencia y probabilidad de impacto (Hungr et al. 1999). La incorporación del proceso de fragmentación en los estudios de propagación de desprendimientos rocosos para la cuantificación del riesgo ha sido discutida por Jaboyedoff et al. (2005); Corominas

(2012), y actualmente ha sido impulsado por los proyectos RockRisk (2014-2017) “Rockfalls in cliffs: risk quantification and its prevention” y Rockmodels (2017-2019) “Characterization and modeling of rockfalls”. Ambos proyectos son complementarios entre sí y están integrados por investigadores de los grupos EGEO- (SGR 0284) y EngGeoModels (SGR 68) de la UPC.

Los proyectos RockRisk y RockModels suponen un avance significativo en este campo y facilitan herramientas muy útiles e innovadoras, que permiten establecer criterios para la adopción de medidas de protección y/o de mitigación. Los escenarios de estudio son desprendimientos de dimensiones medias-pequeñas (menores de  $5 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ ), los cuales permiten profundizar en la caracterización del área fuente, en la identificación de los parámetros condicionantes y en el estudio de la dinámica de bloques.

El proyecto RockRisk ha desarrollado un modelo de fragmentación fractal (RFFM) que relaciona la *In situ Rock Size Distribution* (IBSD) (Latham y Lu 1999) con la *Rock Block Size Distribution* (RBSD) (Hantz, 2014; Ruiz Carulla et al. 2015). El proyecto se ha centrado en tres objetivos:

1. Localizar volúmenes de roca potencialmente inestables y caracterizar el patrón de fracturación.
2. Definir leyes de fragmentación que permitan incorporar el proceso de fragmentación en modelos de propagación (RockGIS) y en el cálculo de las energías de impacto.
3. Desarrollar métodos para la cuantificación de la vulnerabilidad de muros de mampostería (RockDamage)

El proyecto RockModels ha avanzado por el mismo camino, presentando novedades a nivel internacional, tales como el modelo fractal de fragmentación (Ruiz-Carulla, 2015) y un modelo de propagación de desprendimientos fragmentarios (Matas et al 2017), ambos con código abierto y sin coste. Los objetivos parciales han sido:

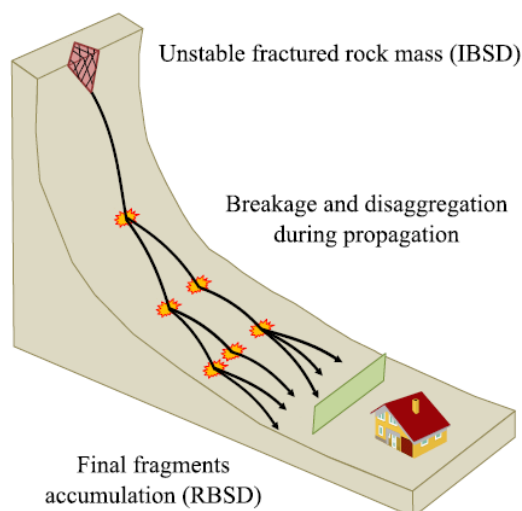
1. Cuantificar y analizar la persistencia de las juntas del macizo y los puentes de roca en el patrón de fracturación.

2. Determinar antes de la rotura, los parámetros del modelo y la distribución espacial de los fragmentos generados.
3. Calibrar y validar el modelo de fragmentación fractal y las leyes de fragmentación incorporadas en el modelo de propagación (RockGIS) e implementar los factores que condicionan la propagación, fragmentación y trayectorias.

### 2.2.1 In situ Block Size Distribution (IBSD) y Rockfall Block Size Distribution (RBSD)

El análisis de propagación requiere del estudio de la distribución de volúmenes de roca inestables antes y después del desprendimiento (Figura 5).

Para representar el volumen de roca inestable se define la *In situ Block Size Distribution* (IBSD) (Latham y Lu 1999). La IBSD es la distribución volumétrica de bloques masivos o de bloques individuales delimitados por la intersección de juntas dentro de una masa rocosa. La *Rockfall Block Size Distribution* (RBSD) (Hantz, 2014; Ruiz- Carulla et al. 2015) caracteriza la distribución volumétrica de fragmentos después de un desprendimiento rocoso. Los fragmentos resultantes incluyen la disgregación de bloques por planos de debilidad o discontinuidades, y/o la rotura de bloques intactos por impacto. Las características de las juntas (persistencia, apertura y orientación), energía de impacto, rigidez del suelo y ángulo de impacto influyen en el proceso de fragmentación (Daussage et al. 2003; Wang y Tonon 2010; Hantz et al. 2014) y, por lo tanto, condicionan la RBSD.



**Figura 5.** Distribuciones volumétricas antes (IBSD) y después (RBSD) del proceso de fragmentación en un desprendimiento de roca (Matas, et al.2017).

### ***Obtención IBSD***

Durante muchos años, la obtención de la IBSD no ha sido tarea fácil, ya que no se disponían de técnicas suficientemente avanzadas para caracterizar el área potencialmente inestable. A partir de los años 70 muchos autores han buscado vías para la obtención de la distribución volumétrica con análisis de las discontinuidades. Desarrollaron avances en simulaciones estadísticas y numéricas que han permitido la caracterización del macizo.

El primer autor en implementar un algoritmo que determinase el volumen de las juntas fue Da Gama (1977). Da Gama consideró las juntas como elementos individuales y con persistencia infinita. Hudson y Priest (1979) representó las juntas, siendo más realista, agrupadas y distribuidas ortogonalmente entre ellas. Maerz y Germain (1996) impulsó un software con escenarios simples de tres juntas ortogonales. Wang et. al. (2003) proporcionó un software complejo que permitía modelar infinitas juntas (obtenidas una serie de mediciones) y tener en cuenta la persistencia de cada una. Los DFNs (discrete fracture networks) fueron impulsados por Rogers et. al. (2007), y han hecho posible la representación de juntas en 2D limitadas en polígonos por su persistencia. Kim et. al. (2007) analizó las juntas ortogonales como semipersistentes (persistentes en una dirección)

En la actualidad, se utilizan la fotogrametría y las técnicas LiDAR para caracterizar la zona de rotura (Brideau et al. 2012; Firpo et al. 2011; Gates et al. 2012; Haneberg et al. 2006; Lato et al. 2012; Pate et al. 2011; Riquelme et al. 2016; Sturzenegger et al. 2009, Royan 2017). La fotogrametría genera un Modelo Digital de Superficie (MDS) que proporciona información de la geometría, textura del macizo y de las discontinuidades. Los MDS son datos de muy buena calidad que permiten una muy buena modelación de los desprendimientos rocosos. El LiDAR extrae nubes de puntos en 3D (Riquelme et al. 2014) y mezclas de imágenes en 3D (Umili et al. 2013).

### ***Obtención RBSD a partir IBSD***

Existen modelos de propagación de desprendimientos rocosos y modelos de elementos discretos (DEM) para el estudio de la dinámica de los bloques y/o fragmentos en desprendimientos rocosos. Los modelos DEM han sido experimentados (Formaro et al

(1990), Itasca (1991), Wang y Tonon (2011), Cuervo (2015). Los cálculos MDE han sido implantados en un código de simulación HY-Stone (Crosta y Agliardi, 2003). Actualmente, este código es de los pocos que considera escenarios realistas y que incorpora el proceso de fragmentación. HY-Stone reproduce por métodos estadísticos la fragmentación de un bloque utilizando una red neuronal de elementos discretos. Existe una limitación en la variabilidad geométrica de la red que reduce el número de escenarios representables. Los modelos MDE son recomendables para el estudio detallado a escala local.

Los modelos de propagación se pueden incorporar en un GIS y realizar un análisis 3D (Guzzetti et al. 2002; Crosta y Agliardi 2003; Dorren et al 2006; Scioldo, 2006). Esta aproximación es más adecuada para el análisis cuantitativo del riesgo.

Hartmann (1969) fue el primer autor que propuso que el RBSD seguía una ley exponencial. Posteriormente, Hardin (1985) representó el RBSD mediante curvas granulométricas.

### **2.2.2 Aplicación Modelos de propagación en RockRisk y RockModels**

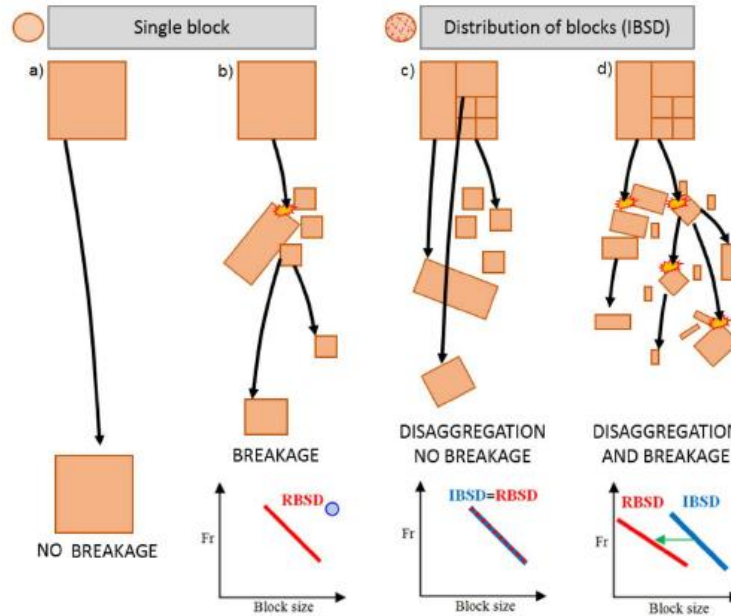
A continuación, se exponen las bases conceptuales de los Proyectos RockRisk y RockModels que se encuentran en la tesis “*Rockfall analysis: failure, fragmentation and propagastion characterization*” (Ruiz-Carulla, 2018) y en el artículo “*RockGIS: a GIS-based model for the analysis of fragmentation in rockfalls*” (Matas, 2017).

#### ***Modelo de Fragmentación (RFFM)***

El modelo de fragmentación RFFM (Ruiz-Carulla, 2015) permite obtener la RBSD a partir de la IBSD. Se consideran cuatro escenarios diferentes, teniendo en cuenta que no todos los bloques presentan la misma intensidad de fisuras, ya que en algunos casos los bloques son masivos. Se consideró que cuando un bloque masivo impacta con el terreno, puede romperse (Figura 6.b) o no (Figura 6.a) y que los bloques con discontinuidades



pueden disgregarse siguiendo los planos de debilidad (Figura 6.c) o disgregarse primero y romperse posteriormente. (Figura 6.d).



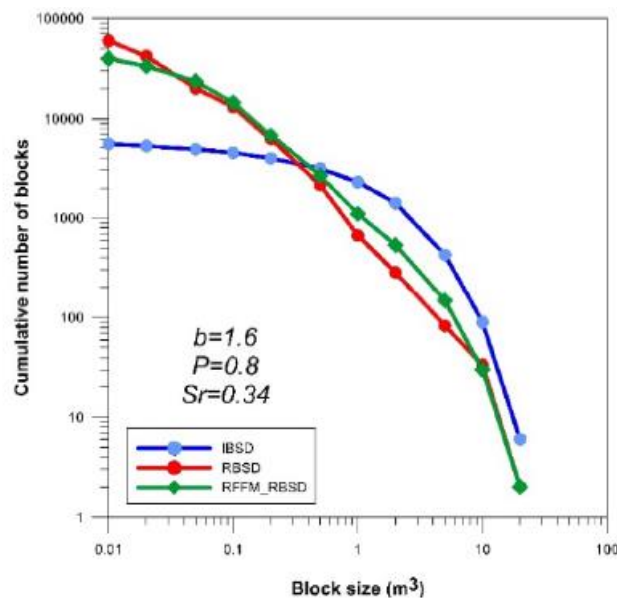
**Figura 6.** Escenarios de análisis considerados por el modelo de fragmentación RFFM (Ruiz-Carulla, 2015).

Si se produce fragmentación, se calcula la distribución volumétrica y las trayectorias de cada fragmento. La distribución volumétrica (RBSD) se representa mediante una ley potencial (E.4) (Ruiz-Carulla et al 2015), siguiendo un proceso aleatorio, en la que la suma de los fragmentos generados se iguale al volumen inicial (Moya et al. 2013).

$$P_i = c \cdot V^{-b} \quad (E.4)$$

Donde  $P_i$  es la frecuencia relativa acumulada de fragmentos;  $c$  y  $b$  son los parámetros que definen la recta de regresión;  $V$  es el volumen de los fragmentos ( $m^3$ )

Se presentaron las curvas granulométricas en términos de número de fragmentos y volumen para el IBSD, el RBSD inventariado en campo y el RFFM\_RBSD obtenido del modelo de fragmentación (Figura 7).



**Figura 7.** Curvas granulométricas del IBSD (azul), RBSD (rojo) y del RFFM\_RBSD (verde).

### ***Modelo de Propagación (RockGIS)***

RockGIS es una herramienta, basada en GIS, creada para simular trayectorias de bloques en desprendimientos de roca, incorporando el proceso de fragmentación (Matas et al 2017). Este modelo numérico de propagación realiza una modelación individual y estocástica. La estocasticidad es una de las principales características en los desprendimientos de roca y una de las mayores dificultades a la hora de modelar, ya que depende de las irregularidades del bloque y de la superficie del terreno (rugosidad) sobre el que impacta (Gischig,2015). El modelo permite abordar incertidumbres comunes en los modelos de propagación tales como el coeficiente de restitución y la rugosidad del terreno, para estimar *a priori* los parámetros que condicionan los desprendimientos de roca.

Las ventajas de RockGIS respecto a otras herramientas de GIS habilitadas para la simulación de desprendimientos de roca se exponen a continuación:

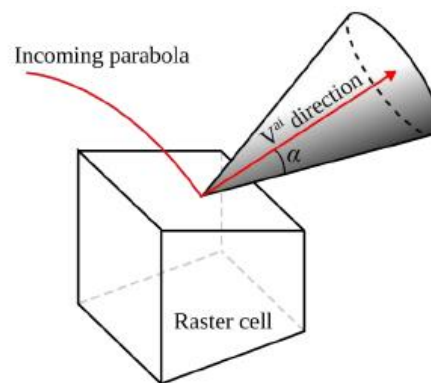
1. Velocidad y trayectoria independiente para cada fragmento.
2. Trayectorias modeladas en función del ángulo de impacto y topografía local
3. Umbral de energía que determina si el bloque fragmenta o no.

#### 4. Distribución espacial de fragmentos calibrada con la ley de fragmentación

RockGIS considera la masa de los bloques concentrada en puntos (*lumped mass*) y no como objetos con forma. Los datos principales que necesita ROCKGIS para realizar la simulación son el modelo digital de elevaciones (MDE), mapa ráster de usos del suelo y las características de los bloques desprendidos (coordenadas, velocidad inicial y número y volumen de fragmentos). Los datos obtenidos en GIS se han calibrado a partir del modelo de fragmentación (Ruiz-Carulla, 2015), de inventarios de desprendimientos y de ensayos de lanzamientos de bloques (Gili et al. 2016). Los MDE realizados con fotogrametría y técnicas LiDAR (utilizados en el proyecto Ruiz-Carulla, 2015) han permitido definir mejor el parámetro de la rugosidad.

A partir de la ecuación de la conservación de la energía durante un impacto con rotura (Giacomini et al. 2009), se ha considerado por separado la pérdida de energía por impacto con el terreno y la pérdida por rotura del bloque. Para definir el rebote, se han utilizado parámetros basados en la disipación de energía. Se ha estudiado la pérdida de energía en términos de velocidad (Kamijo et al., 2000; Paronuzzi, 1989; Spang y Rautenstrauch, 1988; Spang y Sonser, 1995) mediante coeficientes de restitución  $R_n$  y  $R_t$ , que corresponden a la dirección normal y tangencial, respectivamente.

Para calcular la dirección de salida y generar la trayectoria de cada fragmento aleatoriamente, RockGIS supone que las trayectorias de salida se encuentran dentro de un cono, el cual tiene una obertura definida por el ángulo  $\alpha$  (Figura 8).



**Figura 8.** Representación del cono que reúne las trayectorias del fragmento después del impacto. (Matas et al 2017).

## **2.3 Estudio y caracterización vía ensayos (escala real y escala reducida)**

La fiabilidad de los análisis de desprendimientos de roca reside en una buena combinación de métodos empíricos y métodos numéricos. Aunque no siempre se ha dispuesto de los medios tecnológicos para caracterizar y representar los escenarios de riesgo, en el transcurso del tiempo se han realizado muchos avances en este campo.

Para que los modelos de propagación sean útiles se deben ajustar sus parámetros para que los resultados se asemejen lo máximo posible a la realidad. El ajuste de los parámetros se realiza con inventarios y estudios de campo sobre desprendimientos reales que han sucedido y mediante ensayos *in situ*, los cuales están diseñados para obtener determinados parámetros, que no se pueden averiguar a partir de los inventarios anteriores.

Desde los años 60 se han realizado experimentos a escala real y reducida para entender la dinámica y las trayectorias de los volúmenes de roca. Estos análisis han permitido diseñar sistemas de protección, que han sido mejorados gracias al estudio de parámetros vinculados al momento de impacto y fragmentación. Estos parámetros han sido la velocidad angular, el ángulo de impacto, la dispersión lateral/desviación y la variación de energía cinética (coeficientes de restitución). A pesar de estos avances, debido a la aleatoriedad de los rebotes generados por el impacto del volumen de roca con el terreno, todavía quedan incógnitas de estos procesos por resolver. Una de las mayores dificultades es predecir el coeficiente de restitución ya que depende de las características específicas de cada emplazamiento. Existen coeficientes de restitución empíricos proporcionados por estudios, pero lo cierto es, que cada estudio tiene unas ecuaciones y modelos propios ya que utilizan coeficientes de restitución distintos. Estos coeficientes dependen de un parámetro también difícil de obtener, que es la rugosidad. La rugosidad es la variación de la inclinación de la superficie de impacto debido a las irregularidades del talud.

Otras vías de estudio y ajuste de aspectos parciales del comportamiento de los bloques rocosos durante la fragmentación son los ensayos numéricos. Esta vía es menos real y precisa que las otras dos (ensayos a escala real o reducida) para el ajuste de los parámetros internos, pero permite una evocadora visión (microestructural) de algunos fenómenos

imposibles de ver directamente. Generalmente, el método más utilizado para la realización de ensayos numéricos es el DEM (*Discret Element Method*).

En los últimos 10 años, se ha estudiado el papel que ejerce la fragmentación en los procesos de desprendimientos de rocas. Como hemos visto en apartados anteriores, tienen una influencia significativa en la energía y dispersión de los volúmenes de roca. A continuación, realizaremos un recorrido bibliográfico de los ensayos a escala real y reducida que han contribuido en el análisis y remediación de los desprendimientos de roca.

El primer artículo relacionado con los desprendimientos de roca fue publicado por Ritchie M. (1963). Este autor realizó ensayos a escala real para abordar dos cuestiones que hasta ese momento no se habían tenido en cuenta:

1. Descartar las relaciones directas que se establecían erróneamente entre la altura del talud y el ancho del área de llegada de los bloques, para contener los volúmenes de roca.
2. Establecer medios para detener los volúmenes de roca una vez han impactado con el terreno.

Para el estudio de la primera cuestión se realizaron ensayos de caída de bloques en un talud. Los datos obtenidos por los ensayos se registraron con una cámara *slow motion* de 16 mm y se recogieron en tablas los datos del ancho del área de caída, la altura del talud y el ángulo de pendiente. Los datos concluyeron que en las pendientes de grandes magnitudes podía usarse el escarpe horizontal presente a pie de talud, para reducir el momento angular posterior al impacto.

Para el segundo propósito, se realizaron ensayos a pie de talud utilizando un remolque cubierto de tablas e inclinado hacia la pared rocosa. Los resultados dieron la necesidad de reducir la velocidad angular con medidas de protección como zanjas flexibles.

Los diseños de contención propuestos por Ritchie fueron muy innovadores y se extendieron conceptualmente desde entonces. La limitación de estos diseños era sus métodos demasiado conservadores y su coste (inasumible en las obras). Una década después, Fookes and Sweeney (1976) diseñaron sistemas basados en las tablas de Ritchie.

En el 1986, Mak and Blomfield también diseñaron medidas de protección mediante análisis estadísticos de desprendimientos de roca. Se realizaron ensayos a escala real que consistieron en lanzar más de 1000 bloques de tamaños distintos desde 13 taludes con alturas y ángulos de inclinación distintos. Se midieron el número de bloques y las velocidades de caída.

Ese mismo año, otro autor llamado Whiteman (1986) realizó estudios y confirmó que existía una correlación positiva de los resultados de Mak and Blomfield (1986) con los de Ritchie (1963). Posteriormente, Richards (1988) resumió los datos obtenidos por Mak and Blomfield (1986). Años después, investigadores como Martin (1988), Fookes and Weltman (1989) y Kay et al 1993 realizaron más avances en el campo de las medidas de protección ante desprendimientos de roca.

En 1986, Chan Y.C., Chan C.F., y Au, S.W.C. estudiaron las trayectorias de impacto realizando ensayos a escala real en dos tipos de taludes: uno con irregularidades y vegetación y el otro, meteorizado y con depósitos de roca. Se lanzaron 70 bloques de 30 kg desde pendientes de 30° de inclinación. Los resultados empíricos en ambos taludes fueron parecidos. Posteriormente, las velocidades fueron contrastadas, utilizando un análisis matemático de predicción de velocidades que representaba los volúmenes como prismas octagonales. Observaron que las velocidades disminuían a medida que se introducían los parámetros característicos del terreno.

En la década de los 90, Gordon Elliot (1992) diseñó el primer programa capaz de introducir parámetros y simular la caída de los bloques (*Rockfal2D*). Introdujo la aleatoriedad a partir del método Monte Carlo que se basaba en la utilización de un tamaño medio de bloques y una desviación estándar. Se simularon trayectorias en 20 situaciones distintas.

En 1997, Rayudu mejoró este programa creando *WinRock*. Este software permitía extraer a un formato EXCEL la información de los ensayos realizados en el Glaciar Fox (Nueva Zelanda).

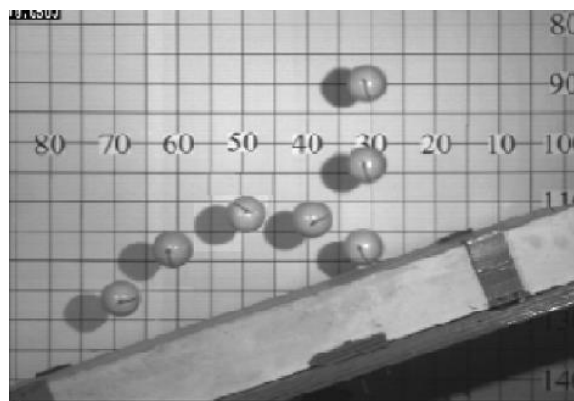
Dos años antes, Azzoni and de Freitas (1995) realizó ensayos e implementó los datos en un programa informático llamado *CADMA*. Los ensayos se realizaron en Italia, en dos canteras de dimensiones y volúmenes de roca variables. Los experimentos supusieron un avance muy grande para los ensayos a escala real, ya que se analizaron coeficientes de

restitución, hasta ahora no tratados. Los ensayos se realizaron en canteras y no en taludes convencionales, de manera que los coeficientes de restitución obtenidos solo eran aplicables para esas características. Los valores de los coeficientes de restitución obtenidos fueron de entre 0.51-0.92. Concluyeron que la velocidad estaba condicionada por la dimensión y la forma de cada bloque, y las trayectorias de los fragmentos eran divergentes entre ellos (aumentando la dispersión).

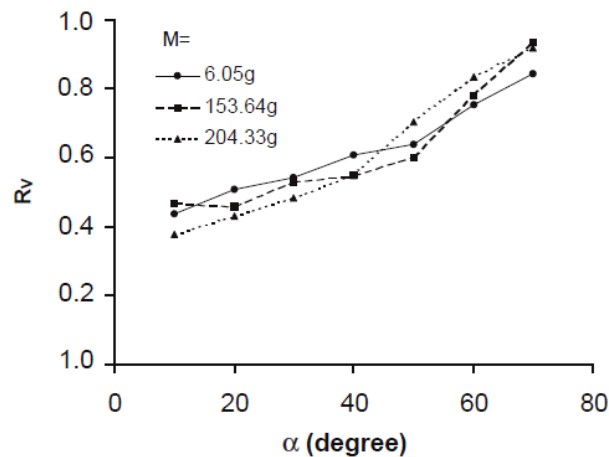
En 1998, Stevens W. incorporó el programa *RocFall*. Este programa implementó modelos numéricos 2D-3D para el cálculo de las distribuciones de energía en los desprendimientos de roca.

En 2002, Chau realizó ensayos a escala reducida para estudiar los coeficientes de restitución. Los ensayos consistieron en lanzar volúmenes esféricos de yeso por una plataforma inclinada fabricada con el mismo material (Figura 9). La inclinación de la pendiente se variaba para evaluar el efecto del ángulo de impacto. Mediante cámaras de alta velocidad se registraron las caídas y rebotes de cada volumen. Los impactos generaban una rotación que variaba los coeficientes de restitución.

Gracias a estos ensayos y a su computación, se generaron gráfico que relacionaban los coeficientes de restitución (en términos de velocidades) con los ángulos de impacto para diferentes volúmenes (Figura 10).



**Figura 9.** Posiciones de las esferas de yeso en la plataforma en imágenes superpuestas (K.T. Chau,2002).



**Figura 10.** Coeficiente de restitución ( $R_v$ ) vs ángulo de impacto para diferentes volúmenes (K.T. Chau, 2002).

Agliardi and Crosta (2003) desarrollaron el modelo STONE, desarrollado con trayectorias de tipo *lumped mass* y basado en ensayos a escala real extraídos de estudios anteriores. Se utilizaron técnicas de alta resolución como LiDAR y se generó un DEM. A partir de los datos empíricos se obtuvieron los coeficientes de restitución y de fricción por *backanalysis*. La comparación entre los datos empíricos y los del modelo validaron los resultados simulados en la modelación 3D. Algunas de las limitaciones del programa eran que no se tenía en cuenta el movimiento rotacional y la fragmentación.

En 2004, Dorren realizó en Francia ensayos a escala real desde un talud de 1200-1400 m y con una inclinación de 38°. Los ensayos consistieron en lanzar 3 bloques con irregularidades desde dos puntos situados a 120 m (con y sin vegetación). Antes de cada lanzamiento se pintaron los bloques para registrar en el terreno las marcas de impacto dejadas durante las trayectorias de los bloques, las cuales permitirían medir las desviaciones o dispersiones laterales. Se creó un mapa de polígonos asignando características homogéneas a toda la superficie y se instalaron cámaras de alta velocidad (2D). Durante los ensayos se usó un láser 3D para medir la distancia y la dirección de cada impacto. Posteriormente, se asignaron al mapa de polígonos tres tipos de coberturas del terreno distintas (en función del diámetro medio) y la rugosidad del terreno en los puntos de impacto.

Dos años después, el mismo autor llevó a cabo 218 ensayos a escala real para cuantificar y modelar los desprendimientos de roca mediante el modelo RockyFor3D.



El proceso de fragmentación dentro de los desprendimientos de rocas fue estudiado por Giacomini (2009). El objetivo de este análisis fue estudiar la influencia del ángulo de impacto en el caso de rocas con foliación. Se realizaron 20 ensayos en una cantera de Italia. Se lanzaron desde 10-40 m de altura, dos tipos de roca foliadas, pero con características mineralógicas diferentes. Se utilizaron dos cámaras de alta velocidad y dos cámaras de video para obtener el ángulo de impacto, las velocidades de los fragmentos y la energía cinética. De los resultados se obtuvieron las siguientes conclusiones, que indicaron como el ángulo de impacto influye más en el proceso de fragmentación, que la intensidad de impacto.

- El umbral de energía cinética de los fragmentos que proceden de rocas foliadas influye la dirección de la carga respecto a los planos de estratificación.
- La energía de impacto durante la fragmentación es relativamente constante.

En 2010, Dewez utilizó técnicas fotogramétricas en ensayos de desprendimientos de roca. A partir de un ensayo a gran escala en la Polinesia francesa, se calibró y modeló en 3D la posición de los bloques. El ensayo consistió en lanzar, desde una excavadora, bloques naturales esféricos y alargados de masa variable y desde puntos distintos. Se utilizaron cámaras réflex de 50 *frames/seg* para medir la velocidad, número de impactos y altura del rebote.

Uno de los mejores procedimientos para obtener los coeficientes de restitución son los ensayos a escala real y reducida. Por ese motivo, en estos últimos 8 años los estudios realizados han tenido como objetivo principal obtener *a priori* los coeficientes de restitución.

Guichen Ma (2011) analizó el mecanismo de pérdida de energía a partir de 7 ensayos y su modelación con DDA (*Discontinuous deformation analysis*). Los ensayos consistieron en lanzar bloques de hormigón desde tres alturas diferentes, utilizando seis cámaras de alta velocidad para registrar las trayectorias.

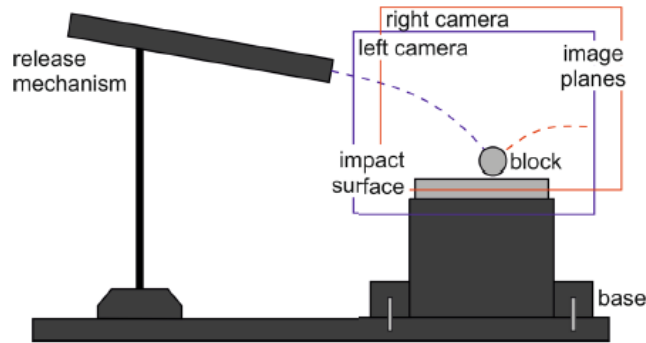
Spadari M and Giacomini (2011) también se centraron en saber los coeficientes de restitución y de rodadura. Para ello, Se lanzaron bloques naturales en cuatro emplazamientos distintos de New South Wales (Australia). Los valores de los coeficientes de restitución normales y tangenciales dieron más altos que los registrados

por otros autores anteriormente, y los de rodadura dieron resultados similares. Los altos valores de coeficientes de restitución fueron debidos a la presencia de bloques muy angulares, alta energía rotacional preimpacto y ángulos pequeños de impacto.

En el 2012, Giacomini realizó más ensayos en Australia, utilizando un sistema fotogramétrico más avanzado para analizar los sistemas *drapery* en la minería. La rotación se obtuvo contando el número de frames registrados por las cámaras de alta velocidad, necesarios para que el bloque llegase a un cuarto de su rotación total.

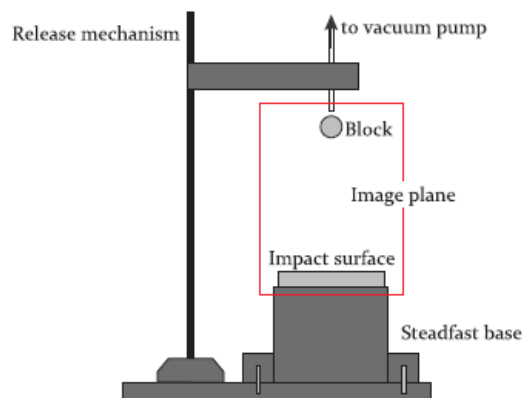
Klette and Volkwein (2013) desarrollaron un sistema para medir directamente las trayectorias. Registraron las aceleraciones y las velocidades rotacionales en 3D, permitiendo el cálculo de la posición del bloque a lo largo del talud (mediante un LPS y un sensor incorporado en los bloques que detecta el impacto y la rotación). La velocidad se obtuvo a partir de señales de GPS. Este sistema de análisis de trayectorias no requería un análisis estadístico y no tenía las desventajas de los videos (resolución, luz, contraste.). La aceleración se calculó mediante un acelerómetro y los movimientos mediante sensores rotacional conectados a un *data logger*.

Asteriou (2016) implementó un modelo 3D para predecir las direcciones y velocidades post-impacto. De nuevo, el modelo se calibró con ensayos a escala reducida realizados en el laboratorio (Figura 11). Los ensayos consistieron en lanzamientos de bloques esféricos y cúbicos para determinar la influencia de la forma en la trayectoria de los bloques. Para las muestras esféricas se obtuvieron valores más altos de coeficientes de restitución y valores más bajos de dispersión, en comparación a las muestras cúbicas. También se analizó el ángulo de impacto, que disminuía a medida que aumentaban los coeficientes de restitución.



**Figura 11.** Equipo experimental (Asteriou, 2016).

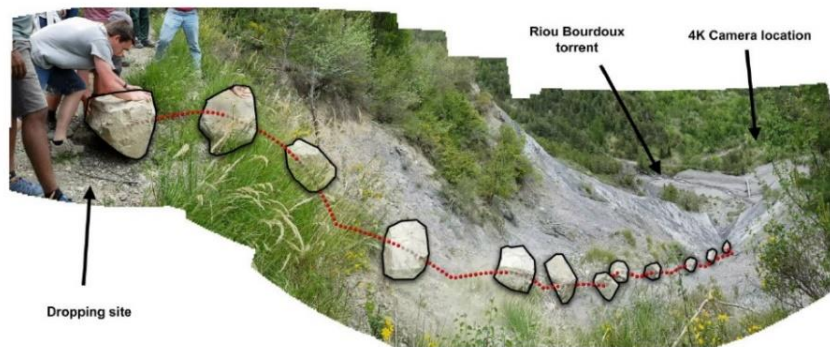
En 2018, el mismo autor analizó un método para predecir un coeficiente de restitución mediante 445 ensayos a escala reducida de bloques de distintos materiales, lanzados sobre una superficie plana (Figura 12). Se eligió una superficie plana para eliminar los efectos del ángulo de impacto, inclinación de la pendiente, rugosidad y velocidad angular. Durante el ensayo se variaron las velocidades y se obtuvieron los coeficientes de restitución. Las conclusiones que se obtuvieron fueron que los coeficientes de restitución están muy afectados por la velocidad incidente, la masa (es preferible calcular el momento) y la dureza del bloque y superficie.



**Figura 12.** Equipo experimental (Asteriou, 2018)

Noel (2018) propuso un método para obtener los coeficientes de restitución combinando las aproximaciones previas y la alta resolución en 3D. Se realizaron ensayos a escala real utilizando 15 bloques de 30-40 cm de diámetro (Figura 13). El método propuesto presentaba las siguientes ventajas:

- Económico, de poca exposición y rápido. Los ensayos se realizaron en canteras y se usaron cámaras y un dron con *scanner* de laser terrestre.
- Buena caracterización del macizo e incorporación de parámetros en los modelos, antes difíciles de obtener.
- Posibilidad de elección del modelo más adecuado para el estudio. Se comparan objetivamente los modelos, proporcionando herramientas de softwares bien capacitados.



**Figura 13.** Localización de los elementos del ensayo y los múltiples *frames* que muestran la trayectoria de los bloques (Noel 2018).

### 2.3.1 Ensayos experimentales en RockRisk y Rockmodels

Se llevaron a cabo tres ensayos a escala real en dos emplazamientos distintos y con tres tipos de litologías distintas. Dos de los ensayos se realizaron el 17 de Junio del 2015 en Vallirana (Barcelona) y un ensayo el 8 de Junio del 2016 en Riudecols (Tarragona). Los experimentos consistieron en lanzar 100 bloques de entre 0.2 - 4.8 m<sup>3</sup> (56 en Vallirana y 44 en Riudecols) desde alturas entre 16.5 - 27.5 m

Los videos de alta velocidad permitieron realizar un seguimiento del número, trayectorias y velocidades de los fragmentos. En la Figura 14 se muestra un *frame* que pertenece a un video de alta velocidad, obtenido en Vallirana (Barcelona).



**Figura 14.** *Frame* del bloque 19 en Vallirana, Barcelona (RockRisk 2015)

Se realizó un inventario para obtener las distribuciones volumétricas y los puntos de parada. Los resultados se graficaron siguiendo una *power law* y dieron valores (en función del número de fragmentos generados de la constante  $b$ ) de entre -0.18 y -0.69.

Debido que durante los ensayos no todos los bloques se fragmentaron, se buscaron los factores determinantes en esta situación. Los factores determinantes fueron el índice de fisuración o longitud de la fisura, el ángulo de incidencia en el momento del impacto en rocas con discontinuidades y la rotación angular del bloque en relación a su estructura interna.

## **3.Diseño y desarrollo de ensayos a escala reducida**

### **3.1 Diseño experimental**

El paso inicial para cualquier ensayo es determinar que variables se quieren obtener y cuáles son las herramientas de las que se puede disponer para la experimentación. Existen dos factores muy importantes a tener en cuenta en este tipo de ensayos: en primer lugar, hay que garantizar la seguridad de los integrantes y, en segundo lugar, hay que seleccionar el emplazamiento y los materiales que más se ajusten a la realidad o que permitan analizar su comportamiento de la forma más realista posible sin alterar los resultados.

El objetivo principal de los ensayos a escala reducida coincide con el objetivo de este trabajo, enunciado en el apartado 1.2. En concreto se trata de evaluar la influencia de la posición espacial o confinamiento de un volumen de roca separado por discontinuidades, en el momento de impacto con el terreno. Centrándonos específicamente en cómo afecta el impacto de los adoquines superiores, a la variación volumétrica y al número de fragmentos de los adoquines situados por debajo.

Para facilitar la comprensión del proceso de conminución, se establecieron condiciones cromáticas, estructurales y dimensionales sobre las agrupaciones o apilamientos a ensayar:

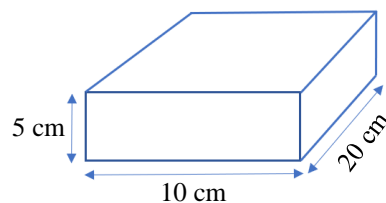
- Un máximo de cinco adoquines apilados. Para distinguirlos, se han utilizado de cinco colores distintos, uno para cada posición de lanzamiento.
- Lanzamientos de adoquines individuales y en apilamientos de 3 y 5 adoquines.
- Adoquines de dimensiones estándar.

En la fase de diseño del ensayo se planteó la posibilidad de ensayar adoquines hechos a medida. Estos debían ser equivalentes a apilamientos de 3 y 5 adoquines. La intención

era simular bloques masivos sin influencia de fracturas. Esta propuesta de utilizar piezas hechas a medida ha resultado inviable debido su elevado coste. Por ese motivo, se ha decidido buscar una solución adhiriendo con *Epoxy* adoquines individuales.

### 3.1.1 Material ensayado

Los materiales han sido solicitados a una empresa del sector de la construcción. Las dimensiones son el estándar de 5 x 10 x 20 cm (Figura 15). Se trata de adoquines corrientes para pavimentos, fabricados por cocción de arcillas limosas con algunos aditivos y colorantes.



**Figura 15.** Dimensiones del adoquín ensayado.

Se han ensayado un total de 327 adoquines de los cuales 75 unidades han sido de tipo “Salmón”; 107 unidades, de tipo “Rojo”; 73 unidades, de tipo “Sahara”; 36 unidades, de tipo “Marrón” y 36 unidades, de tipo “Blanco”. Cada color se ha asignado a una posición en el apilamiento, siendo el blanco (nº5) el situado en la parte superior y el salmón (nº1) situado en la parte inferior (Figura 16).



**Figura 16.** Tipos de adoquines en función del color y de la posición en el apilamiento (1 abajo. 5 arriba).

Para la caracterización de los cinco tipos de adoquines, las muestras fueron sometidas a ensayos de compresión simple y de tracción a cargo del laboratorio GEOMAR Ingeniería del Terreny SLP (Barcelona). Para los ensayos de compresión simple se aplicó una carga vertical de hasta 2000 KN a una velocidad de carga de 0.5 MPa/s. Las propiedades obtenidas para cada tipo de adoquín se resumen en la tabla 3. Los valores detallados se encuentran en el anejo A1.

**Tabla 3.** Propiedades obtenidas en los ensayos de caracterización de los 5 tipos de material.

Propiedades	Salmón (1)	Rojo (2)	Sahara (3)	Marrón (4)	Blanco (5)
Densidad seca (g/ cm <sup>3</sup> )	2.09	2.12	1.8	2.24	2.18
Resistencia tracción (MPa)	2.18	13.88	12.75	11.25	7.8
Resistencia compresión (MPa)	60.9	32.66	21.97	97.43	35.39



Como hemos comentado con anterioridad, los ensayos para el estudio de la conminución se han llevado a cabo en lanzamientos de bloques individuales y en apilamientos de tres y de cinco adoquines. En la Figura 17 se muestra un ejemplo de la disposición de los bloques según el color.



**Figura 17.** Tipos de apilamientos de adoquines (1-3-5).

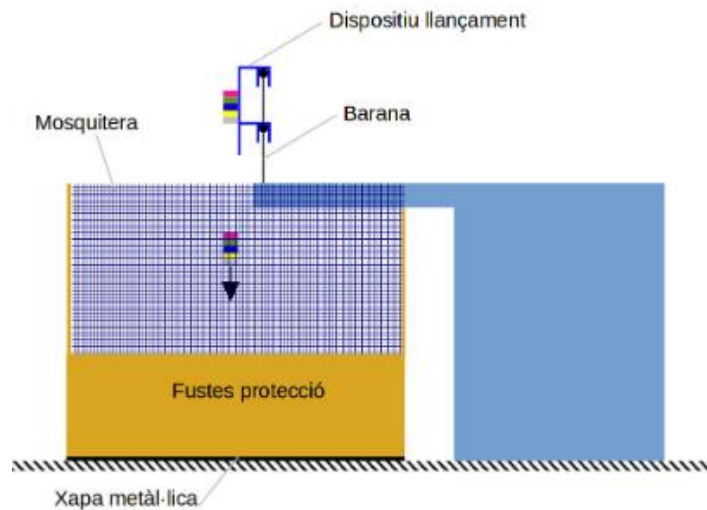
Se han realizado 92 lanzamientos en total:

- 25 lanzamientos de adoquines individuales.
- 32 lanzamientos de apilamientos de 3 adoquines.
- 35 lanzamientos de 5 adoquines.

De los 92 lanzamientos, se ha aplicado la resina *Epoxy* en 14 lanzamientos en total: 7 lanzamientos de 3 adoquines y 7 lanzamientos de 5 adoquines apilados.

### 3.1.2 Montaje general del ensayo

En la fase de diseño es imprescindible controlar el punto de lanzamiento, acotar las zonas de trayectorias y situar las zonas de impacto. La Figura 18 muestra la disposición prevista de los diversos elementos expuestos para la realización de los ensayos de conminución.

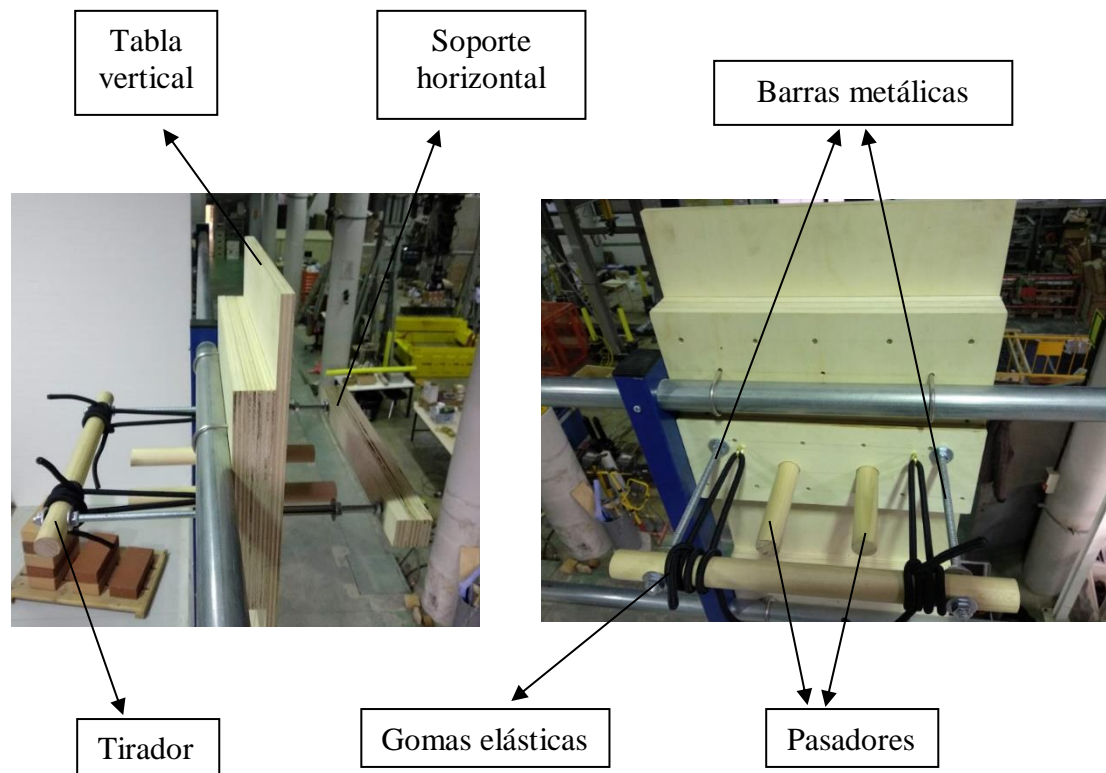


**Figura 18.** Diseño de las estructuras del ensayo de conminución. (Matas, 2018)

#### *Dispositivo de lanzamiento*

El dispositivo de lanzamiento se adosó a una barandilla. El punto de lanzamiento quedó situado a 4.26 m del punto de impacto. El dispositivo (Figuras 19 y 20) ha constado de:

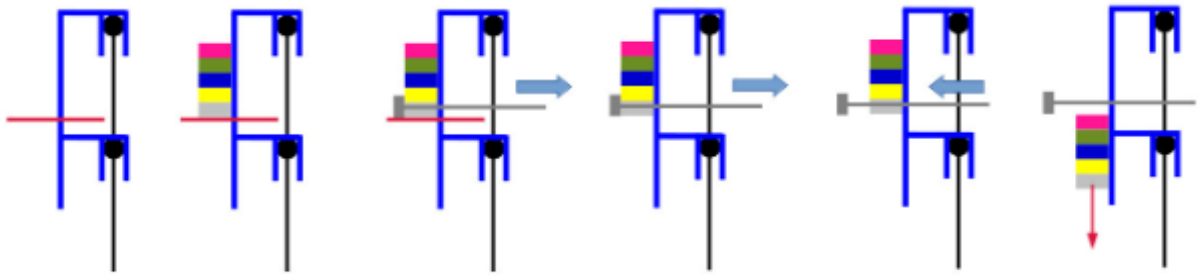
1. Una tabla vertical de madera
2. Dos barras cilíndricas de madera que funcionan a modo de pasador.
3. Dos barras metálicas ancladas en la parte exterior, a un soporte horizontal de madera, y en la parte interior, a un tirador de madera, que ejerce la función de tensor.
4. Dos cuerdas de goma elástica incorporadas al tirador de madera para aumentar la tensión y disminuirla de golpe en el momento de dejar caer los materiales.



**Figuras 19 y 20.** Elementos del dispositivo de lanzamiento utilizado.

El proceso de lanzamiento con dispositivo se ha realizado en una serie de pasos los cuales han sido representados en la Figura 21 (Matas 2018).

- Introducción de los pasadores que se encargan de soportar las piezas temporalmente.
- Colocación de las piezas.
- Ajuste del soporte horizontal con las piezas (ejerciendo tensión con el tirador).
- Retirar los pasadores dejando a las piezas sujetas por tensión horizontal.
- Disminución brusca de la tensión con la ayuda de gomas elásticas.
- Caída de las piezas con mínima rotación.



**Figura 21.** Esquema de los elementos del dispositivo de lanzamiento y del proceso seguido en los ensayos de conminución. (Matas, 2018)

Alternativamente, las muestras podían ser sujetadas a mano por el operador, y soltadas de forma manual.

### ***Cajón de protección***

Se ha diseñado un cajón de protección (Figuras 22-23), alineado con el dispositivo de lanzamiento, encargado de limitar las trayectorias de los fragmentos en el momento de impacto de las piezas con la plancha metálica. Este sistema ha permitido incorporar instrumentos para el registro de datos de todo el proceso de conminución, y fotografiar la distribución espacial de los fragmentos después del impacto. También, se han instalado dianas fijas en los vértices del cajón.

El cajón de protección se compone de varios elementos indispensables (Figuras 24-25) para la seguridad y captación de parámetros.

#### **Cercado de madera:**

Las cuatro paredes de madera se sostienen por cuatro pilares de madera unidos entre sí por la parte superior e inferior, los cuales forman un cajón rectangular. Las dimensiones del cercado se han establecido en base a la altura de lanzamiento y a la densidad de los materiales a ensayar. Para poder acceder al cercado, se ha habilitado una pared con bisagras a modo de puerta.

### Malla antipartículas:

Es un sistema de protección muy efectivo para evitar la proyección de fragmentos de tamaño medio- pequeño. El material se ha adherido a la madera superior mediante grapas, y se han colocado unos contrapesos en los cuatro extremos de la cerca. Los contrapesos permiten mantener la “mosquitera” fija durante el transcurso del lanzamiento y proporcionan movilidad durante la realización de la captación por fotogrametría.

### Plancha metálica:

Tiene unas dimensiones de 1x1 m y un grosor de 10 mm, suficiente para proteger el hormigón del impacto de los bloques. Antes de la instalación se ha limado, para minimizar las rugosidades que podrían condicionar la dinámica de los bloques. También se ha pintado de blanco, para potenciar al máximo el contraste y la reflexión de la luz, de cara a la fotogrametría y captación de imágenes de alta resolución.

Para tener referencias y poder calcular ángulos de impacto, se han distribuido dianas fijas en los vértices de la chapa.

### Láminas de Policarbonato:

Se han realizado 3 aberturas en la madera para situar dos focos a los extremos y una cámara de alta velocidad en el centro. Para proteger los instrumentos del impacto de los fragmentos, se han instalado 3 láminas de policarbonato de tamaño dinA4 entre los elementos y el interior de contenedor.

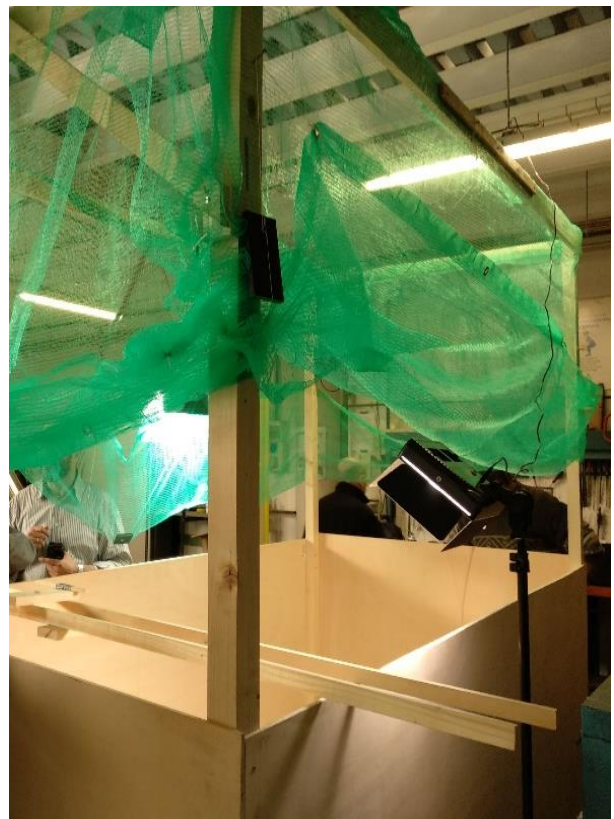
### Focos:

Se han instalado cuatro focos distribuidos por todo el contenedor para iluminar la zona de impacto. Dos focos de alta potencia (equivalentes a 1000 W de bombillas de incandescencia) se han instalado frontalmente y dos focos con pie se han situado a los laterales.





**Figuras 22-23.** Cajón de protección.



**Figuras 24-25.** Elementos del cajón de protección

## **3.2 Realización de los ensayos**

En este capítulo se describe el procedimiento llevado cabo en los ensayos de conminución realizados durante los días 12-13-14 de Diciembre del 2018 en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras (C1) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DECA) en la Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona). Se llevaron a cabo 92 lanzamientos de muestras individuales y de muestras apiladas en grupos de 3 y de 5 adoquines desde una altura de 4.26 m.

Los ensayos se han realizado para aportar información a la calibración de los modelos fragmentarios impulsados por los Proyectos RockRisk y RockModels.

### **3.2.1 Procedimiento**

Para llevar a cabo estas tareas ha sido necesario un equipo de trabajo de mínimo 4 o 5 personas. Se ha seguido el mismo procedimiento para cada uno de los lanzamientos, garantizando la máxima eficiencia y seguridad de los integrantes. Los pasos que se han seguido, en orden cronológico, han sido:

1. Colocación de dianas y de papel de calcar en el punto de impacto. Se han adherido con celo.
2. Colocación de las piezas en el dispositivo de lanzamiento
3. Comprobación de la seguridad del ensayo, asegurando la correcta posición de la malla antipartículas, el cierre de la puerta, y la posición de los integrantes.
4. Puesta en marcha de los focos de alta potencia y de la cámara de alta velocidad.
5. Hacer cuenta atrás del tiempo restante para iniciar el lanzamiento. Este paso permite tener a todos los integrantes alerta y preparados para realizar su tarea.
6. Contar un segundo después del impacto y parar la cámara de video y los focos de alto consumo.
7. Entrar y colocar el volumen de control. El volumen de control sirve como referencia en la fotogrametría.
8. Ejecutar los planos cenitales (fotogrametría).
9. Retirar los fragmentos resultantes y meterlos en sacos numerados.

10. Cambiar el número de ensayo, colocado en la puerta, e introducir una nueva diana y papel de calca en la superficie de la chapa metálica.

Debido a la ausencia de referencias de proyectos anteriores a causa del carácter innovador del ensayo, se han realizado dos modificaciones durante la realización de los ensayos, para mejorar la calidad de los resultados.

En primer lugar; si obviamos las muestras unidas con *Epoxy* y nos centramos en el resto de las agrupaciones de 3 y 5 adoquines, se ha usado en 16 lanzamientos (de los 92 lanzamientos iniciales), cinta adhesiva para mantener unidos los adoquines. Pero posteriormente, se ha prescindido de la cinta adhesiva en el resto de los lanzamientos. Esta modificación ha permitido una representación más realista del proceso de conminución y generación de fragmentos.

En segundo lugar; se ha modificado el medio de lanzamiento. Hasta el número 23 se han lanzado adoquines mediante el dispositivo, pero a partir de este, se han dejado caer sujetándolos manualmente. Este cambio se realizó debido a que el tensor del dispositivo generaba un desplazamiento horizontal añadido que alteraba las condiciones de caída, aumentando el ángulo de rotación desmesuradamente.

### **3.2.2 Seguridad**

Para la prevención de riesgos durante la realización de los ensayos, se ha provisto a cada integrante de unas zapatillas con punta de acero y una vestimenta apropiada. Además, se ha dispuesto de la vigilancia, herramientas y medidas de seguridad generales del Laboratorio de Tecnología de Estructuras (UPC).



### 3.2.3 Registro de datos

Los registros manuales, fotográficos y de video juntamente con los fragmentos recogidos, han proporcionado los datos necesarios para seguir investigando los modelos que incorporan el proceso de fragmentación. A continuación, se exponen las herramientas utilizadas para el registro de datos durante los ensayos de conminución.

#### Hoja de registro manual

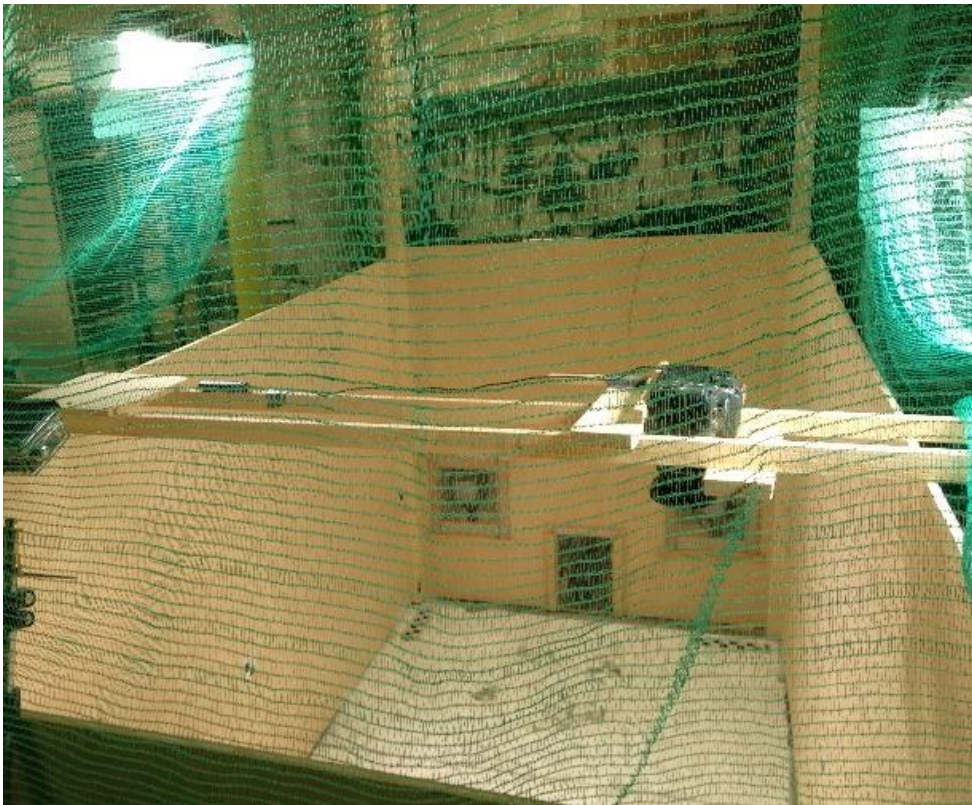
El registro manual se ha realizado con el objetivo de anotar las características de cada ensayo. En la Tabla 4 se muestra un ejemplo de las propiedades incluidas en el registro y las posibles variaciones que se han llevado a cabo durante los ensayos. En el anejo A2 aparece la relación de los 92 lanzamientos.

**Tabla 4.** Características experimentales de los ensayos de conminución.

<b>ID_L</b>	Número del ensayo (1-92)
<b>N.º adoquines</b>	Número de adoquines lanzados en un mismo ensayo.
<b>Día de ensayo</b>	Día de realización del experimento (12-13-14)
<b>Hora de lanzamiento</b>	Hora del momento de lanzamiento de muestras.
<b>Tipo de unión adoquines</b>	Unión con celo, doble celo, sin celo y <i>Epoxy</i> .
<b>Tipo de lanzamiento</b>	Lanzamiento con dispositivo o manualmente.
<b>ISO/Shotter cámara</b>	Características de sensibilidad y velocidad de obturación de la cámara Sony de alta velocidad.
<b>Impacto orientativo</b>	Impacto por punta, lado, separado, muy inclinado/descontrolado.
<b>Observaciones</b>	Características adicionales del ensayo.

## Fotogrametría

La captación fotográfica permite determinar la distribución espacial y volumétrica de los fragmentos después del impacto. Para ello, se ha utilizado una cámara Sony REFLEX en plano cenital (Figura 26). Después de cada impacto se ha colocado sobre un soporte de maderas, el cual ha permitido mover la cámara longitudinalmente y transversalmente por toda la zona de impacto. Durante el vuelo, se ha utilizado un volumen de control (Figura 27) como referencia espacial en x, y, z.

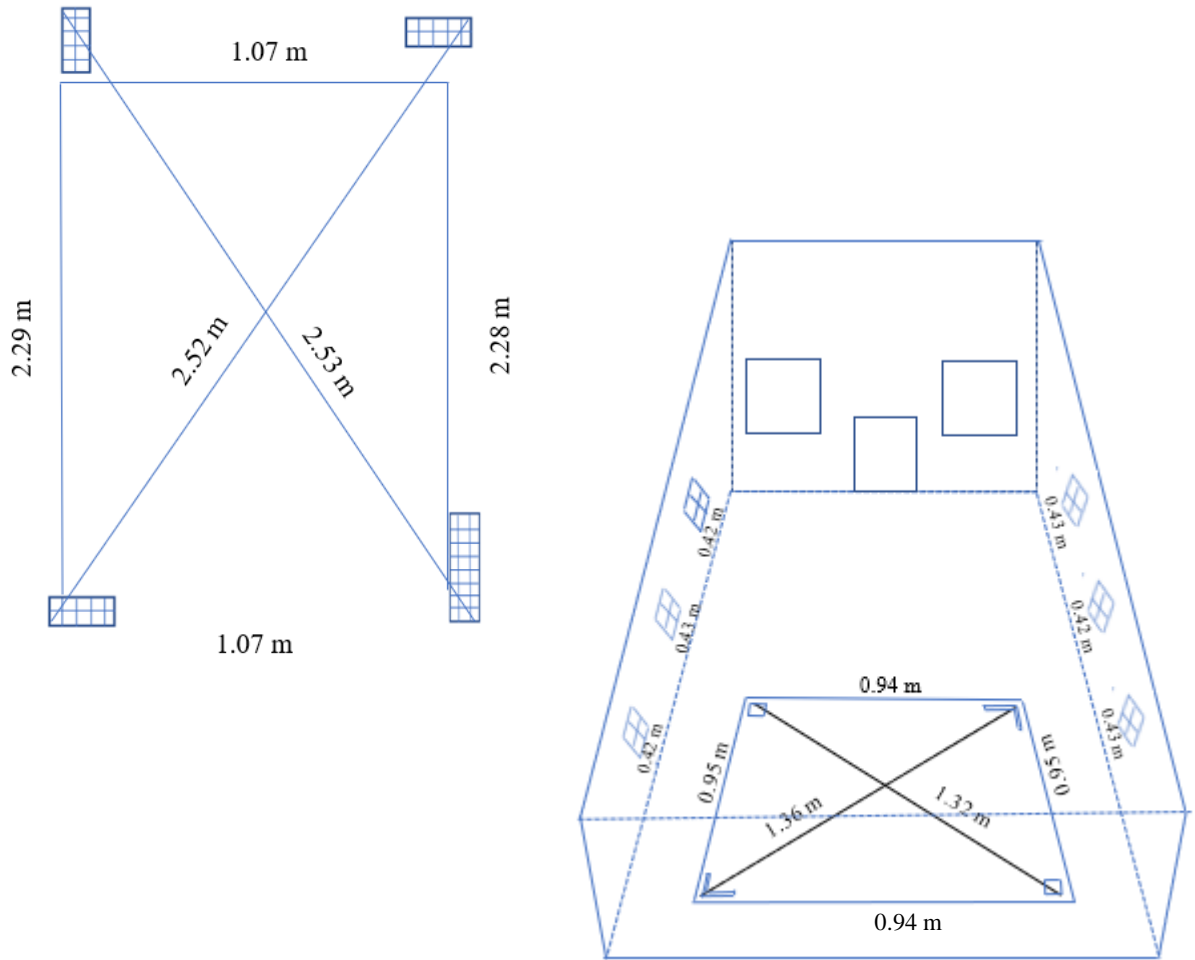


**Figura 26.** Cámara Sony REFLEX en plano cenital.



**Figura 27.** Volumen de control (prisma de  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) situado a la derecha del punto de impacto.

Previamente a la captación fotográfica conviene fijar dianas que sirvan como puntos de control o escalas. También es muy importante, conocer muy bien las dimensiones de la zona de impacto y las distancias entre los elementos que la conforman. Estas medidas se muestran en la Figuras 28 y 29.



**Figuras 28 y 29.** Medidas de posición de los elementos, registradas previamente a la realización de los ensayos.

### Videogrametría

La captación videográfica se ha realizado mediante una cámara Sony NEX-FS700R de alta velocidad (400 *fps*) y una cámara de tipo GoPro Hero 4.

La cámara de alta velocidad se ha situado a nivel del suelo, en un plano frontal y a una distancia adecuada del punto de impacto (Figuras 30 y 31). La videogrametría permite identificar el momento y ángulos de impacto y realizar un seguimiento del número de fragmentos y trayectorias. La videogrametría también permite calcular las velocidades de

los fragmentos, pero en este trabajo se ha prescindido de su estudio dado que no era el objetivo del ensayo.

La cámara GoPro Hero 4 se ha colocado frontalmente y ha proporcionado videos convencionales que han servido para documentar los ensayos (Figura 32).



**Figura 30.** Cámara frontal de alta velocidad.



**Figura 31.** *Display* de la cámara frontal de alta velocidad.





**Figura 32.** Cámara GoPro Hero 4 enfocando a la zona de impacto.

#### Papel de calco y dianas:

El método utilizado para determinar los primeros puntos de impacto (antes de cualquier rebote) de cada ensayo, ha sido la colocación de un papel con dianas sobre un papel de calco de color amarillo (Figura 33). En el momento de impacto, el papel con dianas (separadas a 10 cm) se impregna del color amarillo procedente del papel de calco. Estas marcas de impacto podrán ser tratadas en trabajos o desarrollos paralelos al presente trabajo, pero fuera del mismo.



**Figura 33.** Papel de calco amarillo y dianas a una distancia de 10 cm.

### 3.2.4 Recogida de muestras

Los adoquines resultantes de la conminución se han barrido con delicadeza y se han introducido en sacos individuales numerados por ensayo (Figura 34). Cada saco contiene al menos una bolsa hermética con los fragmentos más pequeños generados durante el ensayo. Estas muestras se han analizado posteriormente mediante la elaboración de curvas granulométricas de número de fragmentos- volumen máximo según se explica en el capítulo siguiente.



**Figura 34.** Sacos con los fragmentos recogidos en los ensayos de conminución.

## 4. Resultados

### 4.1 Granulometrías

La distribución volumétrica resultante de un proceso de fragmentación es una tarea que puede realizarse manualmente, mediante extrapolaciones de ortofotos en 2D o por extracción de nubes de puntos en 3D. Las dos últimas técnicas han sido experimentadas por varios autores y actualmente siguen estudiándose.

La medición manual en muchas ocasiones, debido al gran número de fragmentos que se generan por conminución es una tarea demasiado larga y tediosa. En este trabajo se ha conseguido analizar un volumen total de  $0.11 \text{ m}^3$  en tiempo récord, gracias a un sistema de captación semiautomático y a unos criterios establecidos por el proyecto *RockModels*. El post-procesado de datos se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Mecánica de Suelos (UPC).

Se ha realizado un visionado de todos los videos para seleccionar aquellos en que las geometrías del impacto fueran adecuadas para el estudio de la conminución. Se han descartado los ensayos fallidos o con ángulos de impacto el suelo demasiado grande y se han ponderado todos los lanzamientos de 0 a 2 en función del grado de apilamiento de los adoquines durante la caída. Los valores asignados han sido 0 para los ensayos en los que los adoquines no estaban alineados durante la caída y 2 para los adoquines alineados sin casi desplazamiento horizontal. Se han inventariado todos los lanzamientos excepto los puntuados con valores de 0 dado que el grado de confinamiento era tan bajo que no representaba la situación que queríamos estudiar.

Para analizar la distribución volumétrica de los fragmentos generados se han seguido una serie de pasos que se exponen a continuación.



#### 4.1.1 Tamizado

Se ha utilizado un tamiz de 4.76 mm de apertura (Figura 35) para descartar la fracción fina no retenida, la cual no ha formado parte del análisis granulométrico. Esto se debe a la imposibilidad de distinguir y separar manualmente fragmentos tan pequeños y de colores tan similares. La fracción fina retenida por el tamiz (Figura 36) se ha pesado para cada ensayo dando valores de entre 5.53-125.28 g. Para obtener el peso se ha restado la tara, que en todos los casos ha sido de 362.22 g.



**Figura 35.** Tamiz de 4.76 mm de apertura del Laboratorio de mecánica de suelos (UPC)



**Figura 36.** Fracción fina retenida y considerada en el análisis granulométrico.

#### 4.1.2 Clasificación

Se han clasificado los fragmentos por colores y orden de apilamiento (Figura 37). El proceso de clasificación ha tenido una duración máxima aproximada de 45 minutos. Este tiempo de ejecución, corresponde a los apilamientos de 5 muestras y está muy condicionado por dos factores. En primer lugar, los colores “Salmón” y “Sahara” son muy parecidos. En segundo lugar, la muestra de tipo “Blanco” está pintada exteriormente, pero en la parte interior tiene un color muy parecido a los de tipo “Salmón” y “Sahara”.

En ambas situaciones se ha tenido especial detenimiento al separar las muestras, para evitar cualquier posible equivocación.



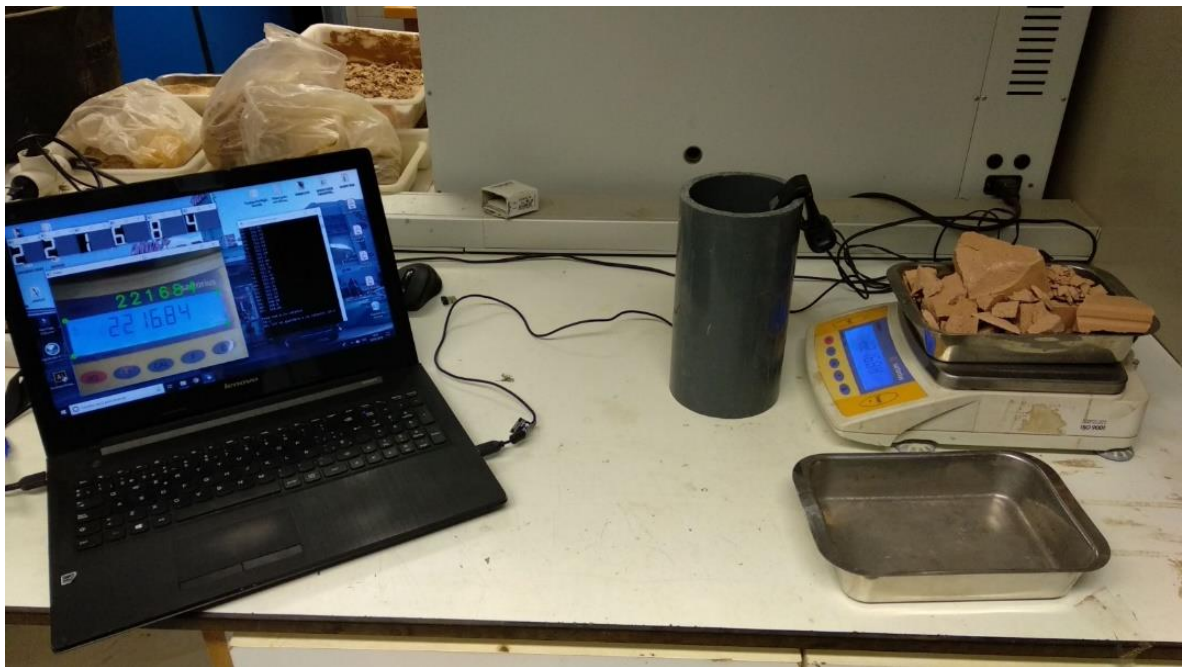
**Figura 37.** Clasificación de las muestras por colores en el ensayo nº 60.

### 4.1.3 Medida

El último paso del post-procesado llevado a cabo en el laboratorio ha sido la medida de los volúmenes de los fragmentos. Se ha medido la masa individual de los fragmentos (Figura 38) con la ayuda de una báscula y un sistema de captación semiautomático. Para calcular los volúmenes de cada fragmento a partir de la masa individual medida, se han utilizado las densidades de los adoquines.

Cada una de las bandejas con los fragmentos correspondientes a un adoquín, se ha colocado en una bascula y se han ido extrayendo uno a uno los fragmentos tomando medidas después de cada extracción. De esta manera, la diferencia entre las dos medidas nos ha dado el peso del fragmento extraído.

Para economizar el tiempo y aumentar la precisión se ha desarrollado un sistema de captación de datos semiautomático (Matas 2018). Este sistema de captación se desarrolló en el lenguaje de programación PYTHON, usando la librería OpenCV y tiene una precisión de 0.01 g. El procedimiento consiste en colocar estratégicamente una webcam enfocando los dígitos variables de la báscula. Esta alineación permite que, al sacar un fragmento, se realice una captura de los dígitos de la báscula presionando la tecla “Enter” y que, automáticamente, los datos se exporten un fichero .txt el cual se puede abrir con EXCEL. Para el correcto funcionamiento de este procedimiento es indispensable una buena calibración inicial. La calibración se basa en marcar con exactitud los vértices de la pantalla de la báscula y si es necesario, en modificar el rango de brillo dentro del lenguaje de programación. Si no se marcan con exactitud los vértices puede suceder que no registre alguno de los dígitos o que tarde más en captarlos. Si el sistema no capta todos los dígitos en el momento de apretar la tecla “Enter”, se archiva como nulo. Esta modificación se realiza manualmente con el soporte de la captación fotográfica del sistema. En los ensayos con gran número de fragmentos que registrar, que el sistema tarde más en captar los dígitos por mala calibración aumenta muy considerablemente el tiempo de ejecución.



**Figura 38.** Elementos utilizados en el proceso de medición por peso de las muestras ensayadas.

El tiempo invertido para cada ensayo se ha recogido en la Tabla 5. Los valores mínimos corresponden a ensayos de bloques individuales y los valores máximos corresponden a ensayos de bloques en grupos de cinco adoquines.

**Tabla 5.** Tiempo mínimo y máximo invertido para cada uno de los 92 ensayos.

<b>Tiempo de Separación</b>	5 - 45 min
<b>Tiempo de medida</b>	20 min - 2.30 h
<b>Tiempo Total</b>	10 min - 2.40 h

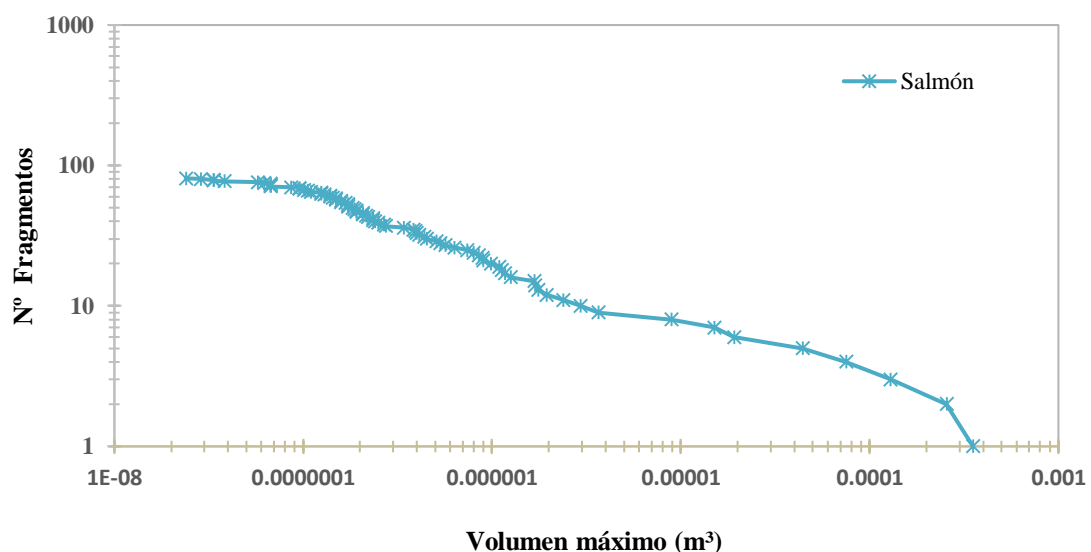
## 4.2 Curvas granulométricas resultantes

A partir de los datos registrados con el procedimiento de medición por peso, se han obtenido las distribuciones granulométricas de 69 ensayos (ver el Anejo A5). Para obtener los volúmenes ( $\text{m}^3$ ) de cada fragmento a partir de la masa (g) se han utilizado las densidades ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) de cada adoquín. Se han representado los lanzamientos individuales, de tres y cinco adoquines mediante curvas granulométricas en términos de número de fragmentos-volumen máximo, distinguiéndose los ensayos con resina *Epoxy* y los ensayos de cinco adoquines apilados del mismo color. En el Anejo A3 se recogen los *frames* (videogrametría) correspondientes a los ensayos que se muestran a continuación.

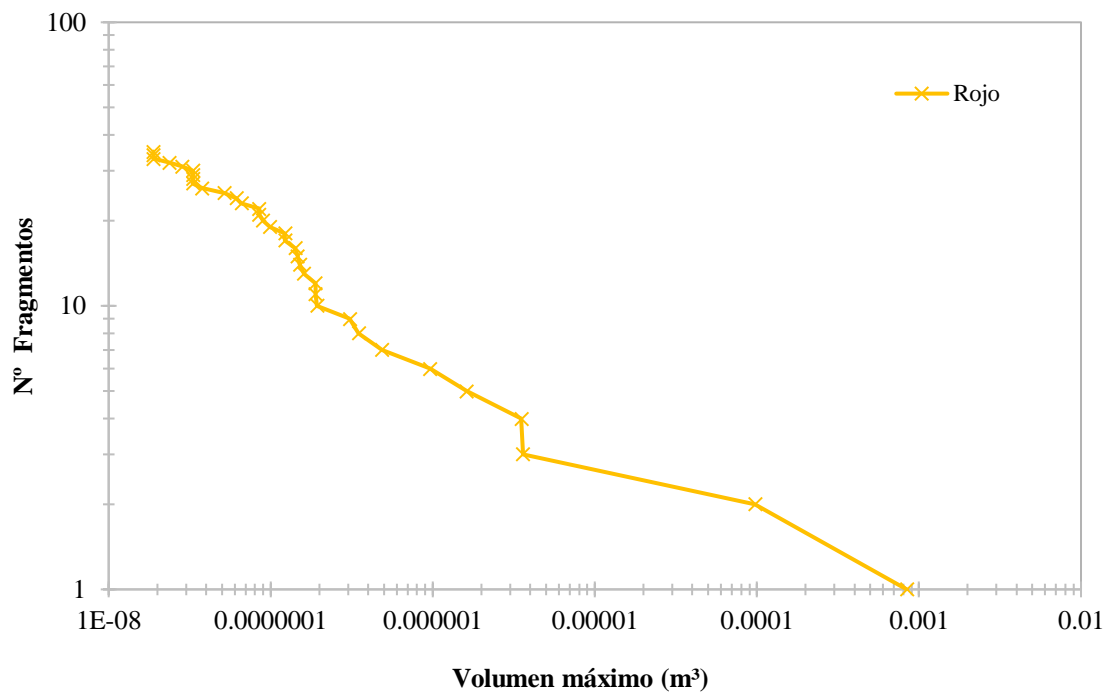
### 4.2.1 Lanzamientos Individuales

Del total de 25 muestras individuales ensayadas, en las Figuras 39-40-41 se exponen a modo de ejemplo, tres ensayos de tipo “Salmón”, “Rojo” y “Sahara”. En cada gráfico se observa la tendencia básica de la fragmentación: a medida que transcurre el proceso de conminución, se generan nuevos fragmentos y el volumen disminuye.

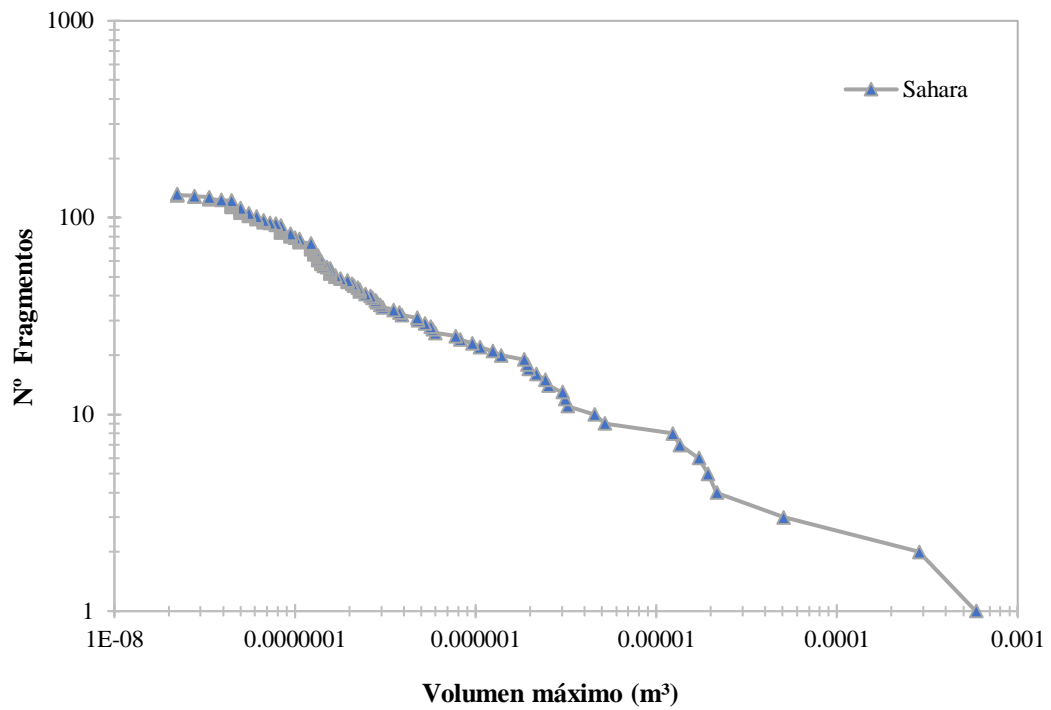
Se observa un menor número de fragmentos en las muestras de tipo “Rojo” y un mayor número de fragmentos en las muestras de tipo “Sahara”. Dado que todos se han lanzado aplicando la misma energía, la diferente dinámica entre un bloque de un tipo u otro reside en la densidad seca ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) y las características de impacto (por un vértice, un lado o una cara).



**Figura 39.** Nº de fragmentos acumulados vs Volumen de fragmentos de tipo “Salmón” obtenidos del ensayo 52



**Figura 40.** Nº de fragmentos acumulados vs Volumen de fragmentos de tipo “Rojo” obtenidos del ensayo 43.

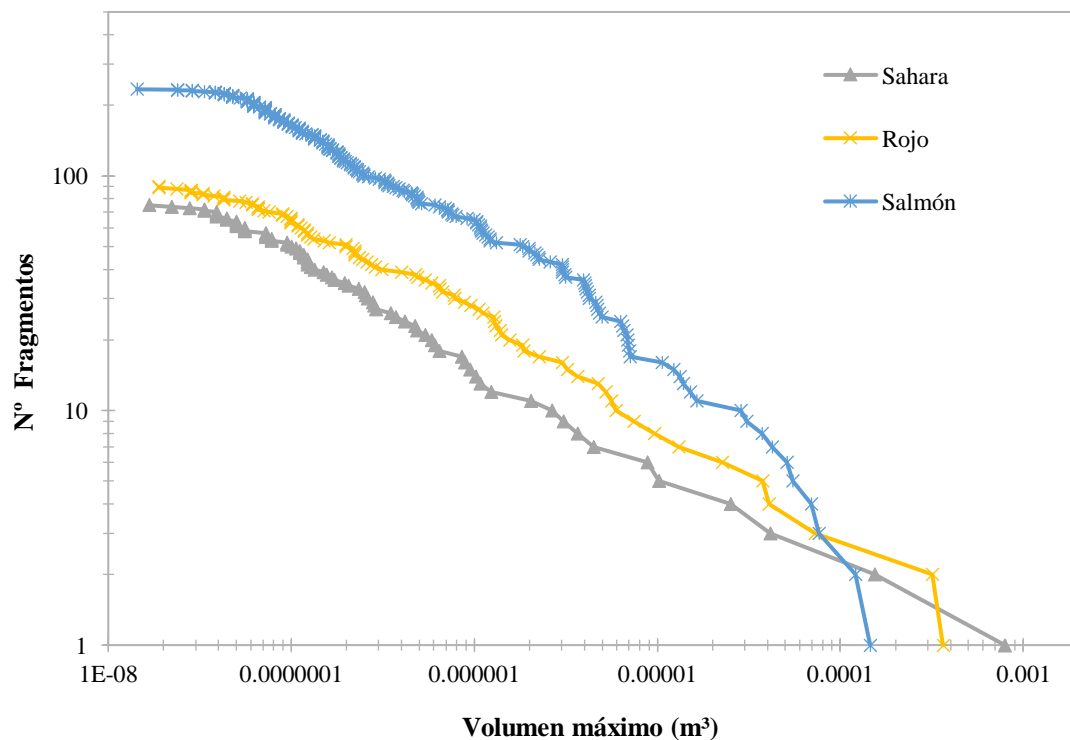


**Figura 41.** Nº de fragmentos acumulados vs Volumen de fragmentos de tipo “Sahara” obtenidos del ensayo 55.

#### 4.2.2 Lanzamientos de 3 adoquines

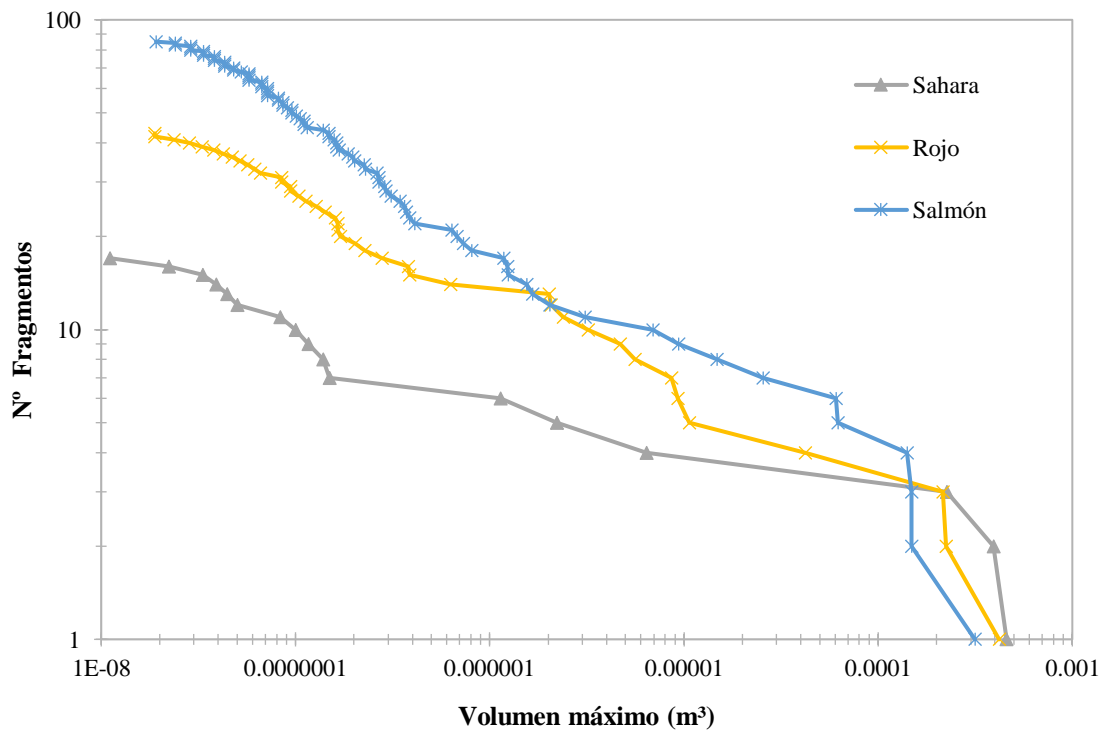
En la Figura 42 se muestra la distribución granulométrica del ensayo 62. Se observa que las curvas granulométricas correspondientes a cada uno de los adoquines varían en función de su posición de apilamiento. El de tipo “Salmón” es el que más fragmentos genera (posición inferior), seguido del Rojo y del Sahara (posición superior). Inversamente ocurre con el volumen máximo de los fragmentos, siendo mayor para el de tipo “Sahara”, seguido del Rojo y del Salmón.

En la Figura 43 se representa el ensayo 85, en el cual las muestras fueron pegadas con *Epoxy*. Se observa un menor número de fragmentos y un volumen máximo mayor que en las muestras no adheridas entre ellas.



**Figura 42.** Nº de fragmentos acumulados vs Volumen de fragmentos obtenidos del ensayo 62.





**Figura 43.** Nº de fragmentos acumulados vs Volumen de fragmentos obtenidos del ensayo 85.

#### 4.2.3 Lanzamientos de 5 adoquines

En la Figura 44 se muestra la distribución granulométrica del ensayo 33. Se observa la misma tendencia que en el ensayo de tres adoquines, los adoquines situados más abajo rompen generando un mayor número de fragmentos. El orden de mayor a menor fragmentación sigue una tendencia de Salmón > Rojo > Sahara > Marrón > Blanco.

En la Figura 45 se ha representado los resultados del ensayo 88, en el que se ha utilizado *Epoxy*. En comparación a la Figura 37, el volumen máximo ha aumentado y el número de fragmentos ha disminuido (a excepción del tipo Salmón, que se mantiene).

La Figura 46 muestra el ensayo 91 realizado con 5 adoquines de tipo “Rojo”. A diferencia del ensayo individual representado en la Figura 33, se ha incrementado el número de fragmentos de 35 a 1172 y ha disminuido el volumen máximo de  $8.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  a  $9.06 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ . En el post-procesado de este ensayo, no se ha podido separar los fragmentos por posiciones porque todos son del mismo color. Por ese motivo, se ha representado la



variación del volumen y del número de fragmentos del total de los adoquines, y se le ha denominado “Rojo total”.

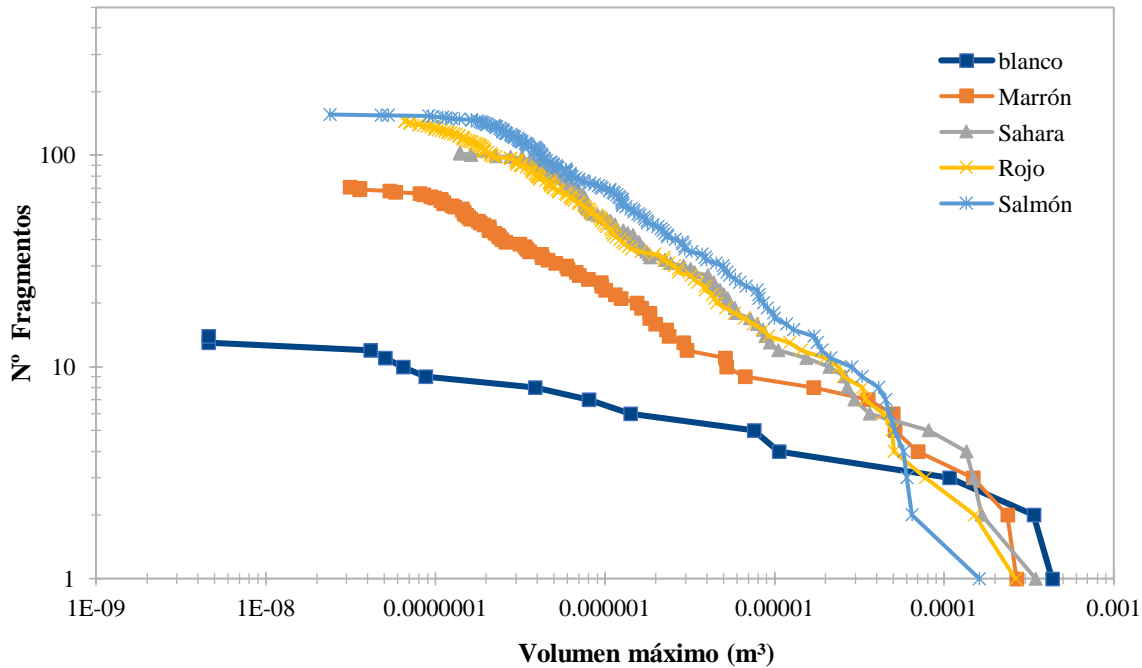


Figura 44. Nº de fragmentos acumulados vs Volumen de fragmentos obtenidos del ensayo 33.

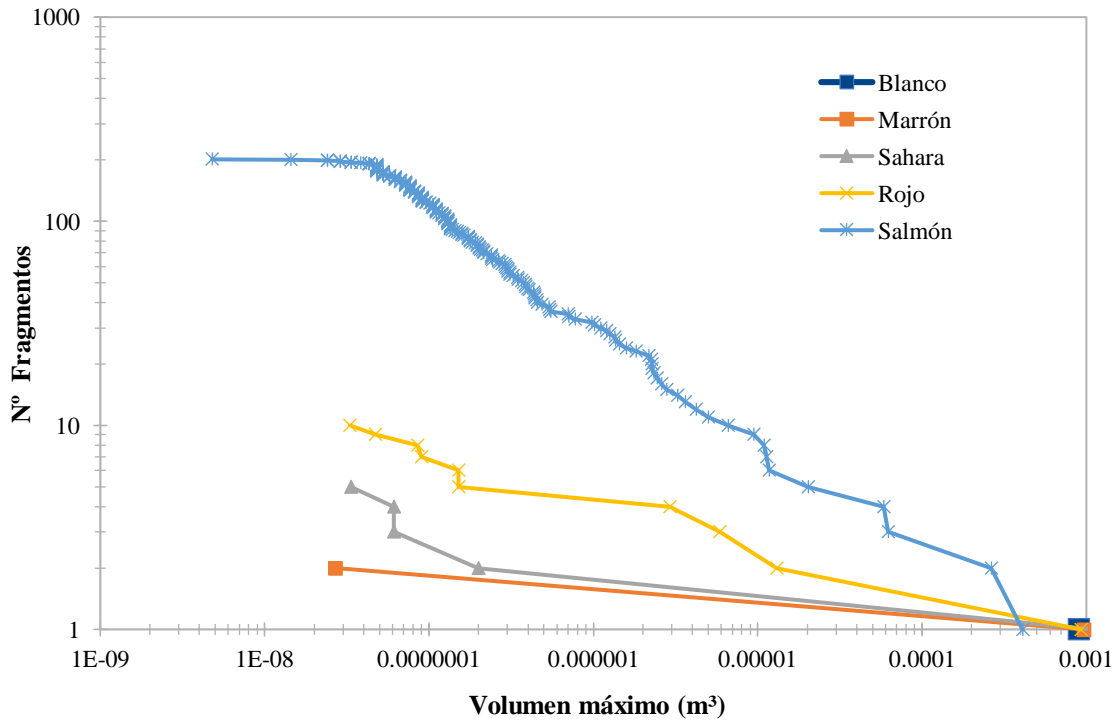
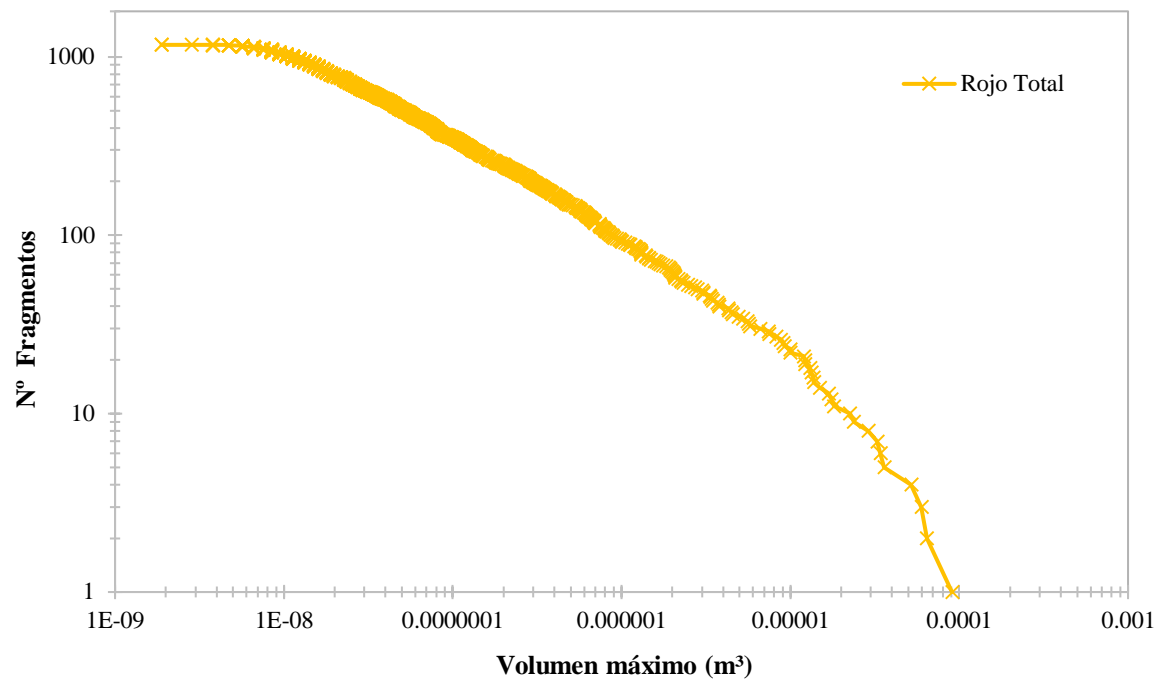


Figura 45. Nº de fragmentos acumulados vs Volumen de fragmentos obtenidos del ensayo 88.

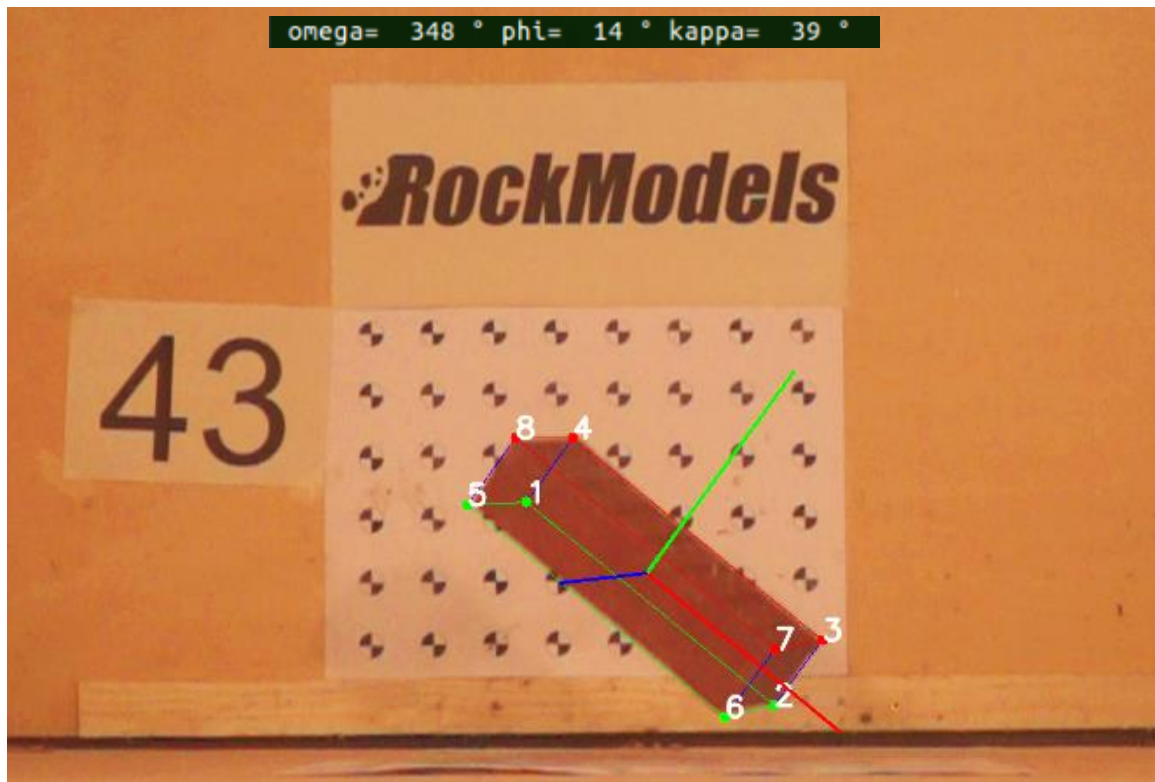


**Figura 46.** N° de fragmentos acumulados vs Volumen de fragmentos obtenidos del ensayo 91.

### 4.3 Otros resultados post-ensayo

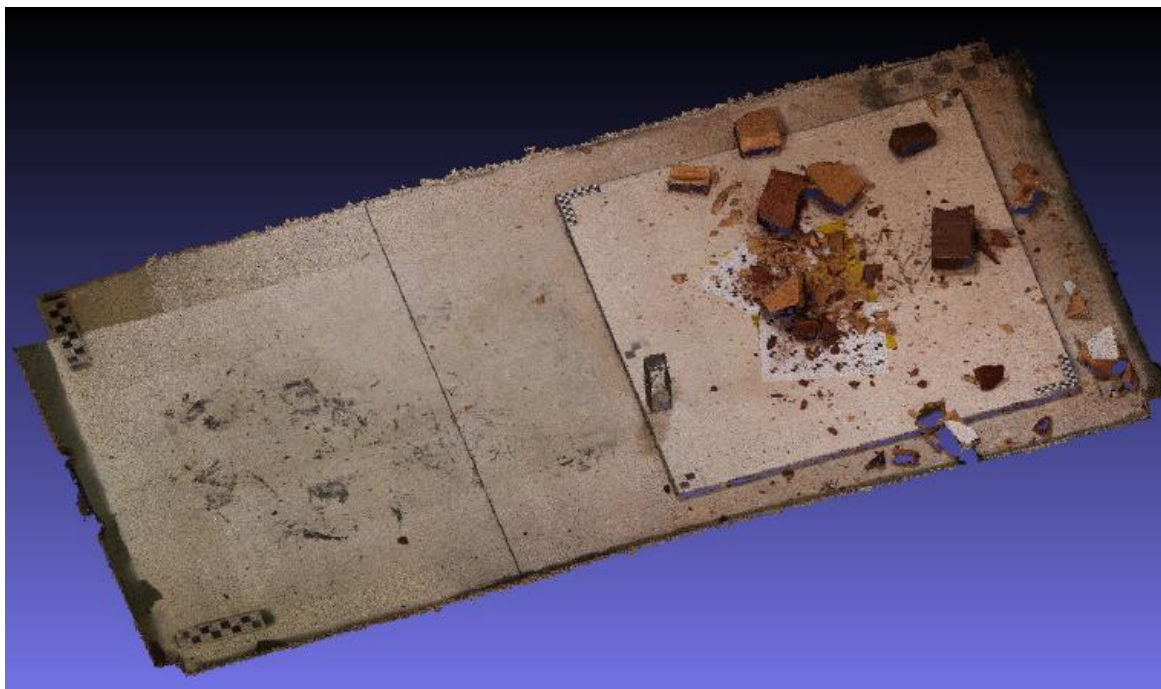
Paralelamente a la realización de este trabajo, varios autores están estudiando otros resultados a partir de los datos registrados en los ensayos de conminución. Cuando se hayan obtenido todos los resultados, se analizarán juntamente con los datos obtenidos en este trabajo.

Por un lado, se está estudiando la posición relativa de las muestras en el momento de impacto. La obtención de los ángulos de impacto es imprescindible, ya que determina la geometría del impacto y la posterior propagación de las ondas de tensión en los adoquines. Para determinar los tres ángulos de posición se hace coincidir un poliedro tridimensional en el espacio, con el *frame* de la muestra en el momento del impacto (Figura 47). Los *frames* se obtienen del registro videográfico proporcionado por la cámara de alta velocidad.

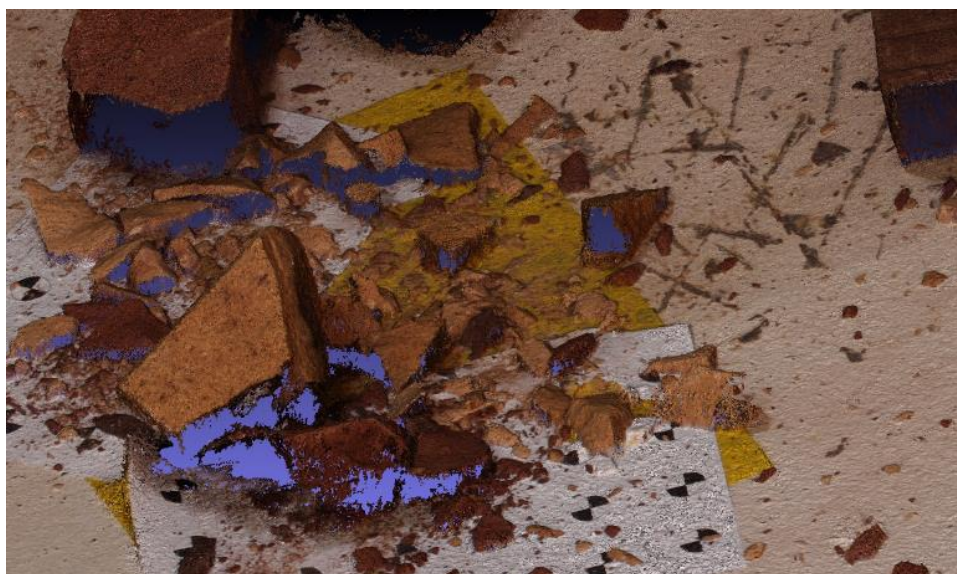


**Figura 47.** *Frame* del ensayo 43. Se indica la forma del polígono y los ángulos resultantes.

Por otro lado, se están realizando modelos 3D de los depósitos a partir de las técnicas de fotogrametría digital (Figuras 48 y 49). La fotogrametría permite obtener modelos 3D a partir de imágenes en 2D, muy útiles para caracterizar la zona de impacto y obtener las distribuciones espaciales y volumétricas de los fragmentos generados.



**Figura 48.** Modelo 3D del área de impacto.

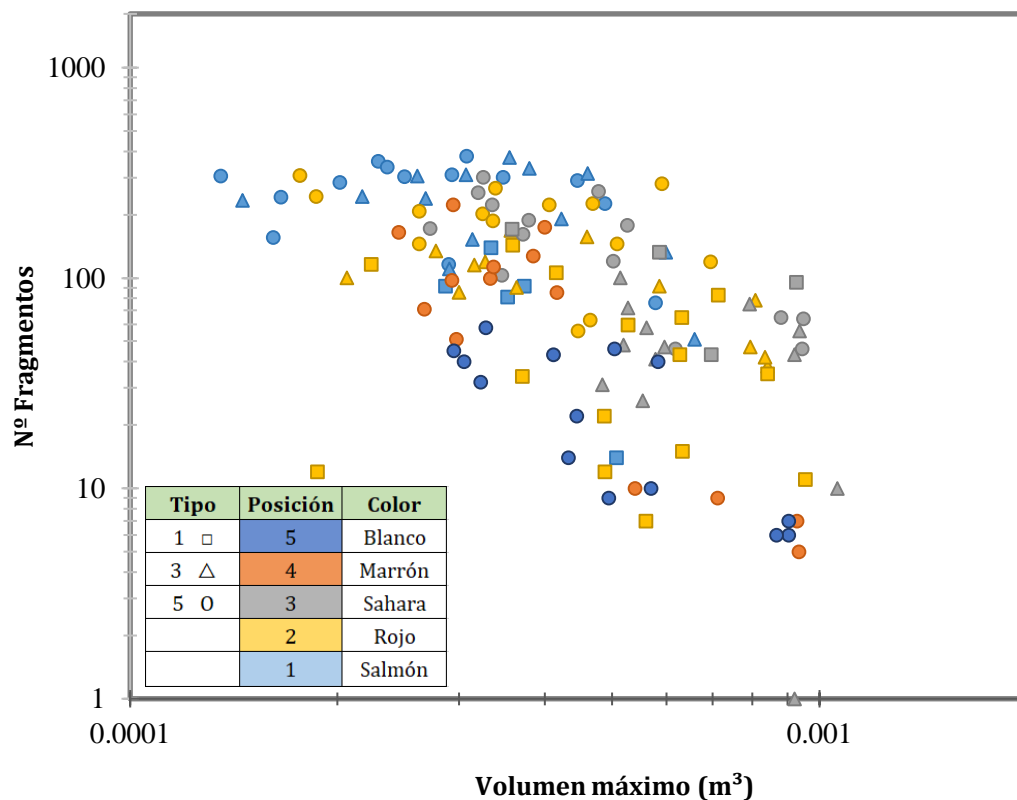


**Figura 49.** Ampliación de los fragmentos generados en el modelo 3D.

## 5. Análisis y discusión de resultados

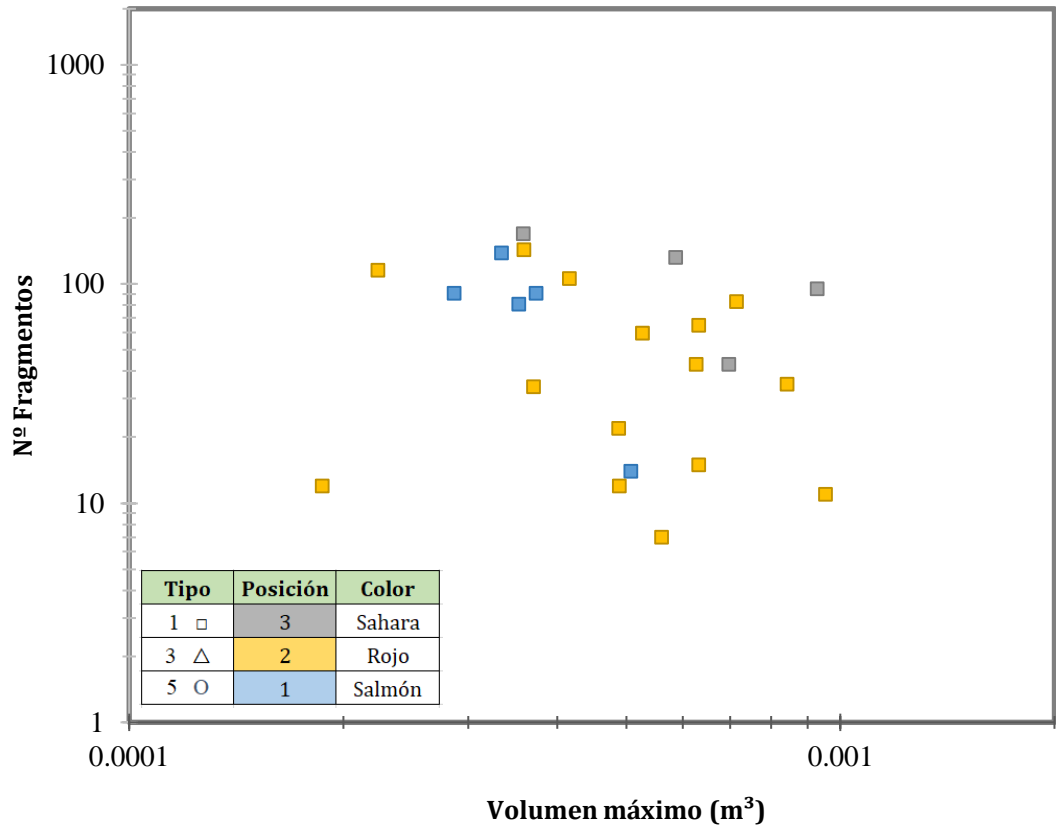
Uno de los objetivos del trabajo era analizar las diferencias de conminución entre adoquines apilados y adoquines macizos. Para ello, se adhirieron los adoquines mediante resina *Epoxy*. Los resultados de estos lanzamientos no han representado la dinámica real de un bloque macizo dado que algunos adoquines se han quedado pegados en el momento de impacto. Por ese motivo, nos hemos centrado en cómo los ensayos de conminución (sin *Epoxy*) han permitido estudiar la influencia de la posición/confinamiento de cada uno de los adoquines, en el momento de impacto.

La Figura 50 muestra el número y el volumen máximo de fragmentos de los lanzamientos. Se han representado tres geometrías distintas en función del número de adoquines, y se han empleado cinco variedades cromáticas que corresponden a las posiciones de cada una. Se han obtenido valores de volúmenes y números de fragmentos de entre  $1 \cdot 10^{-4}$  –  $1 \cdot 10^{-3}$  y 1 - 1200, respectivamente. Los resultados indican un aumento de número de fragmentos y una disminución del volumen máximo, en las muestras situadas en posiciones más inferiores.

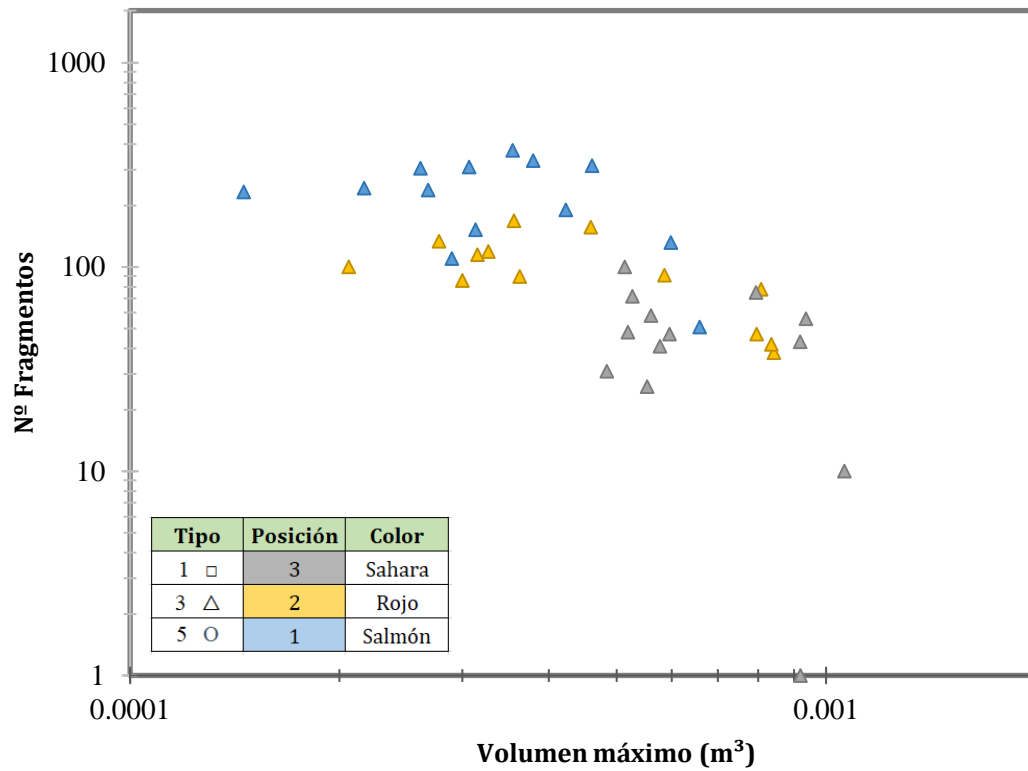


**Figura 50.** Nº de fragmentos- Volumen máximo de todos los lanzamientos.

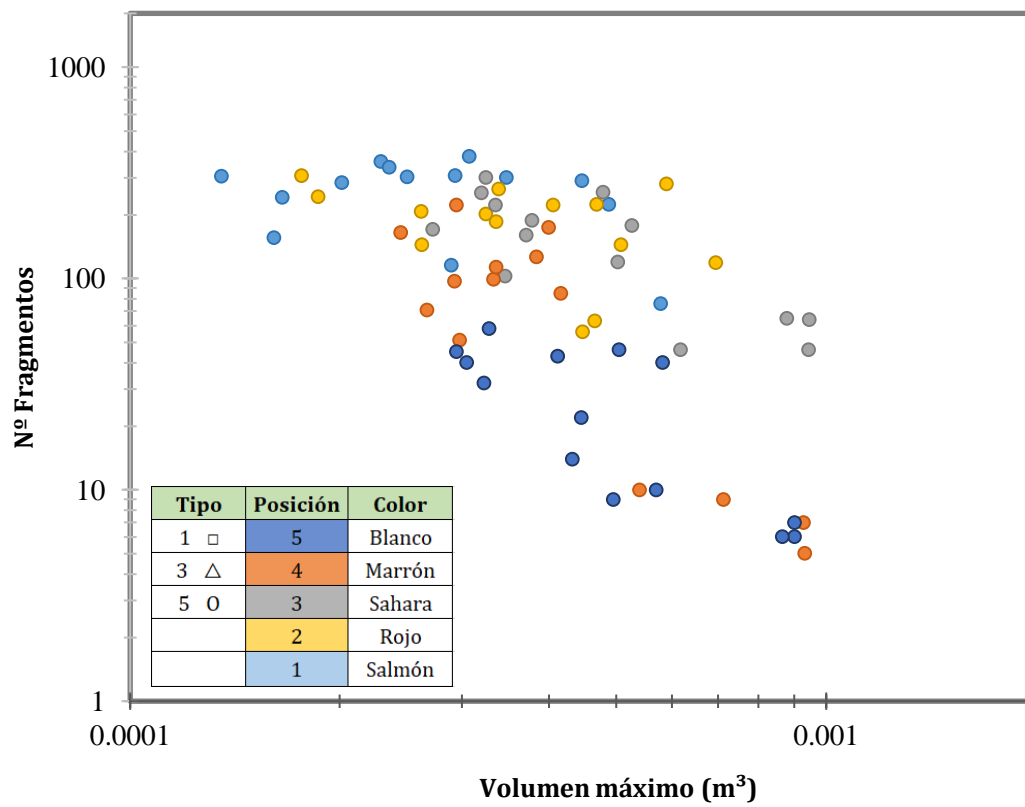
Si estudiamos las distribuciones granulométricas de los distintos adoquines en cada tipo de lanzamiento, se observa un comportamiento muy distinto para cada una (Figuras 51-52-53). Se observa como para un mismo color, a medida que añadimos muestras al lanzamiento, este genera un numero de fragmentos mayor y su volumen máximo disminuye. Esto es debido a que, a mayor confinamiento, el adoquín está sometido a más energía y, por lo tanto, la onda de presión que recibe al fragmentarse es más grande.



**Figura 51.** Nº de fragmentos- Volumen máximo de cada color en todos los lanzamientos individuales.

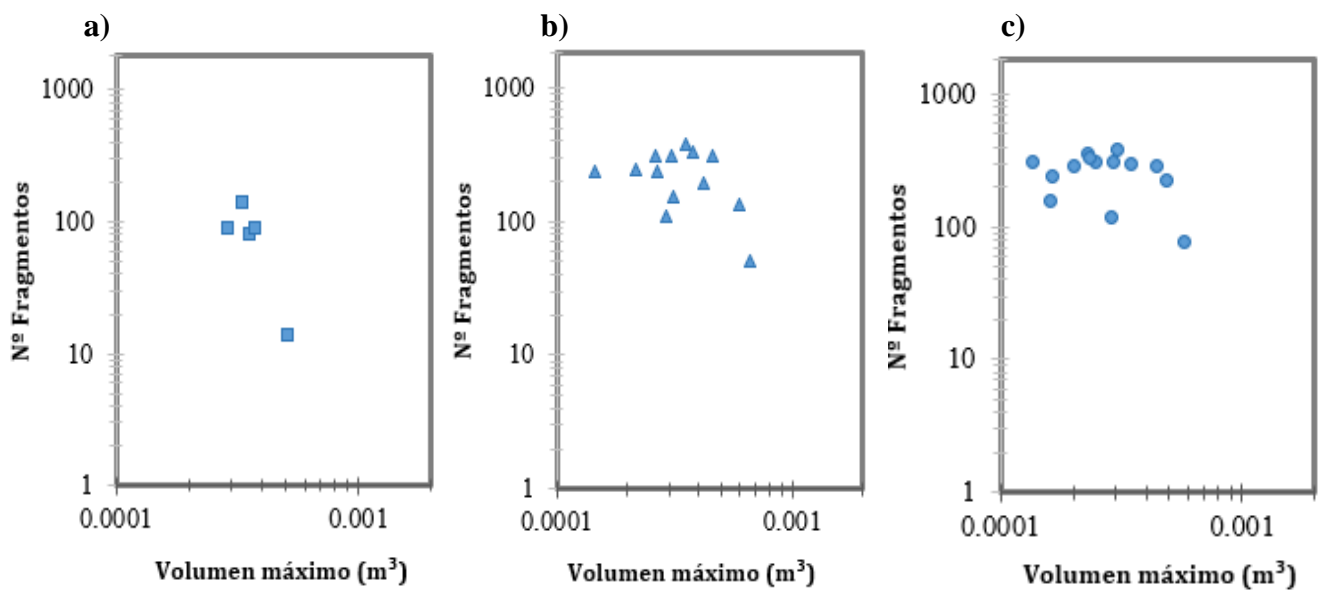


**Figura 52.** Nº de fragmentos- Volumen máximo de cada color en todos los lanzamientos de tres adoquines.



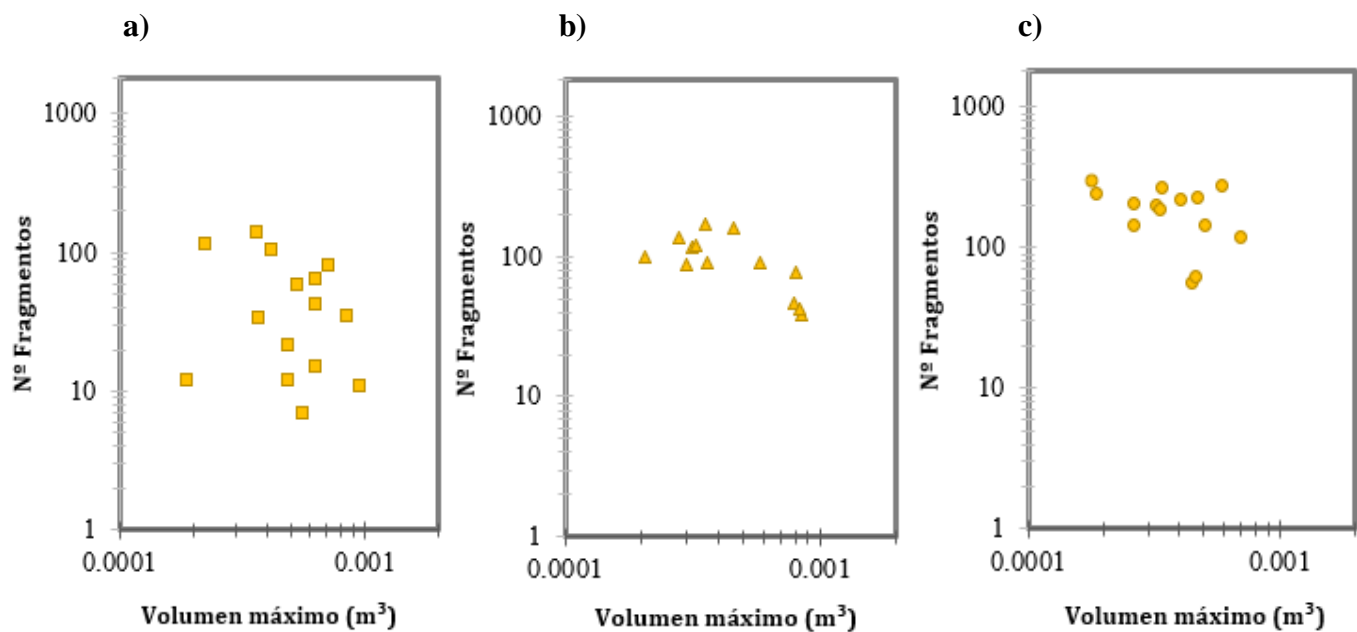
**Figura 53.** Nº de fragmentos- Volumen máximo de cada color en todos los lanzamientos de cinco adoquines.

Se ha analizado individualmente la dinámica de conminución de los adoquines de color Salmón, Rojo y Sahara en función de cada tipo de lanzamiento. Las Figuras 54-55-56 muestran la variación del número de fragmentos y volumen máximo ( $m^3$ ) a medida que aumenta el confinamiento. Para cada caso, se observa de izquierda (a) a derecha (b) una disminución del volumen máximo y un aumento de fragmentos. Si se comparan los tres colores de adoquines, se observa claramente como debido al confinamiento, el color que rompe en más fragmentos es el Salmón seguido del Rojo y del Sahara. Inversamente proporcional es el volumen máximo, siendo superior en el Sahara, seguido del Rojo y del Salmón.

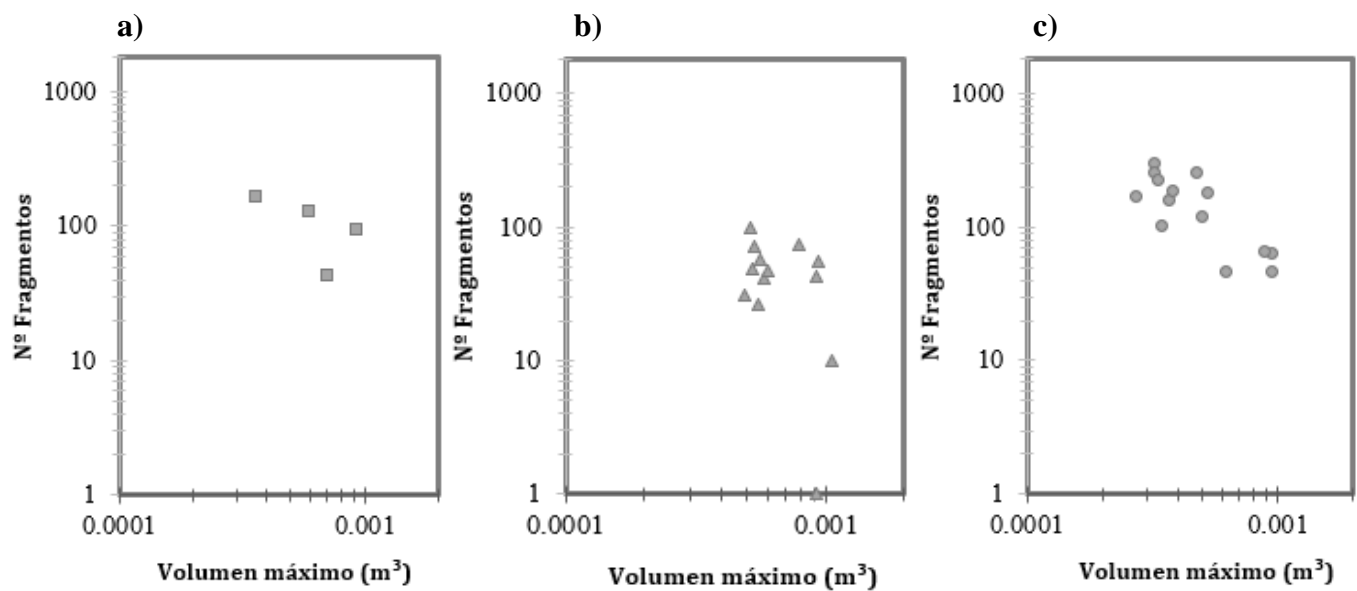


**Figura 54.**  $N^{\circ}$  de fragmentos- Volumen máximo del color Salmón en: a) lanzamientos individuales. b) lanzamientos de 3 adoquines c) lanzamientos de 5 adoquines.



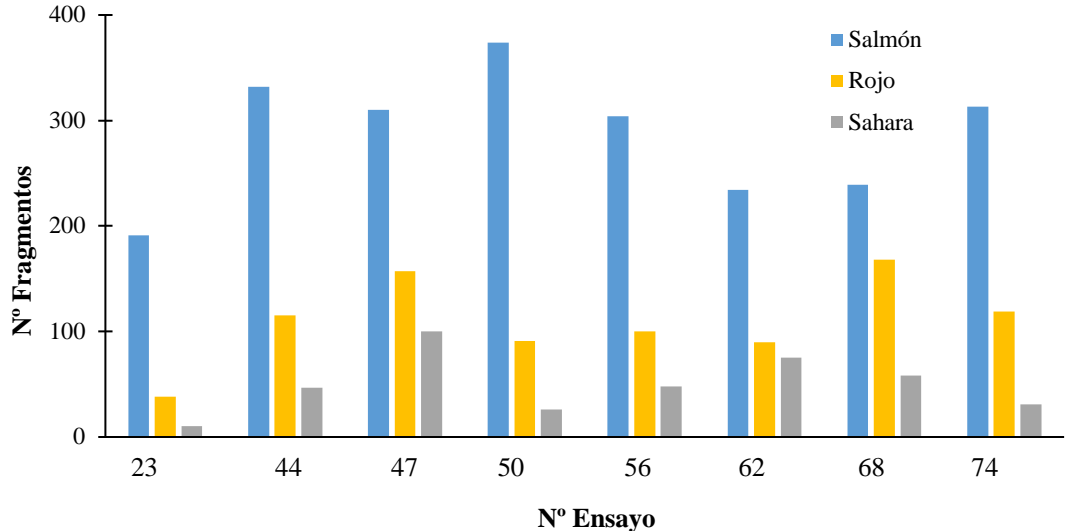


**Figura 55.** Nº de fragmentos- Volumen máximo del color Rojo en: a) lanzamientos individuales. b) lanzamientos de 3 adoquines c) lanzamientos de 5 adoquines.

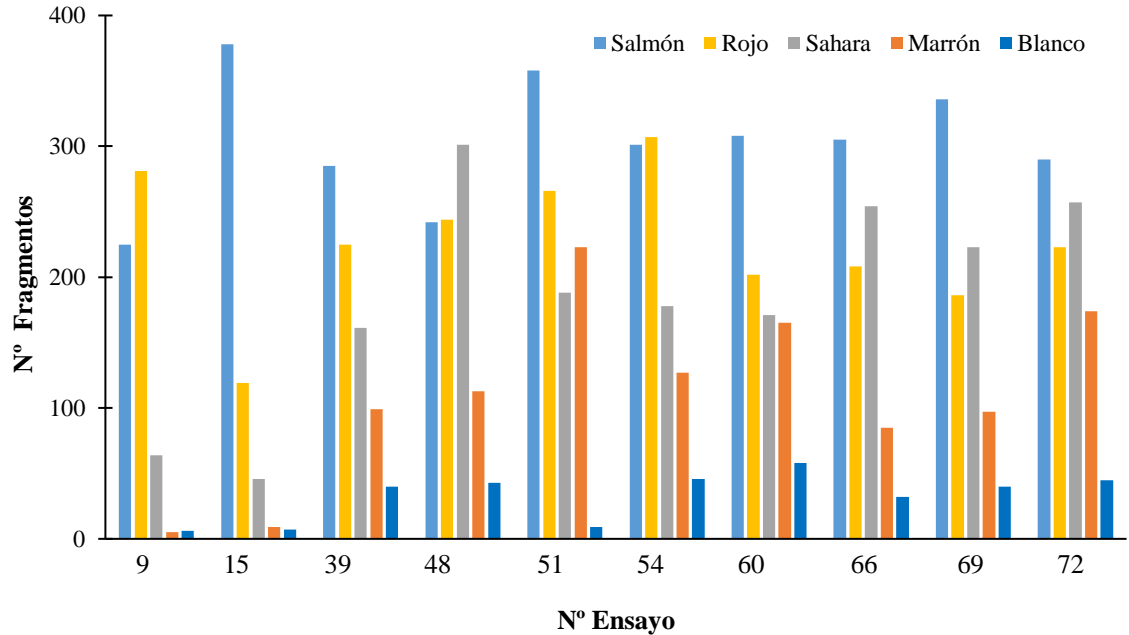


**Figura 56.** Nº de fragmentos- Volumen máximo del color Sahara en: a) lanzamientos individuales. b) lanzamientos de 3 adoquines c) lanzamientos de 5 adoquines.

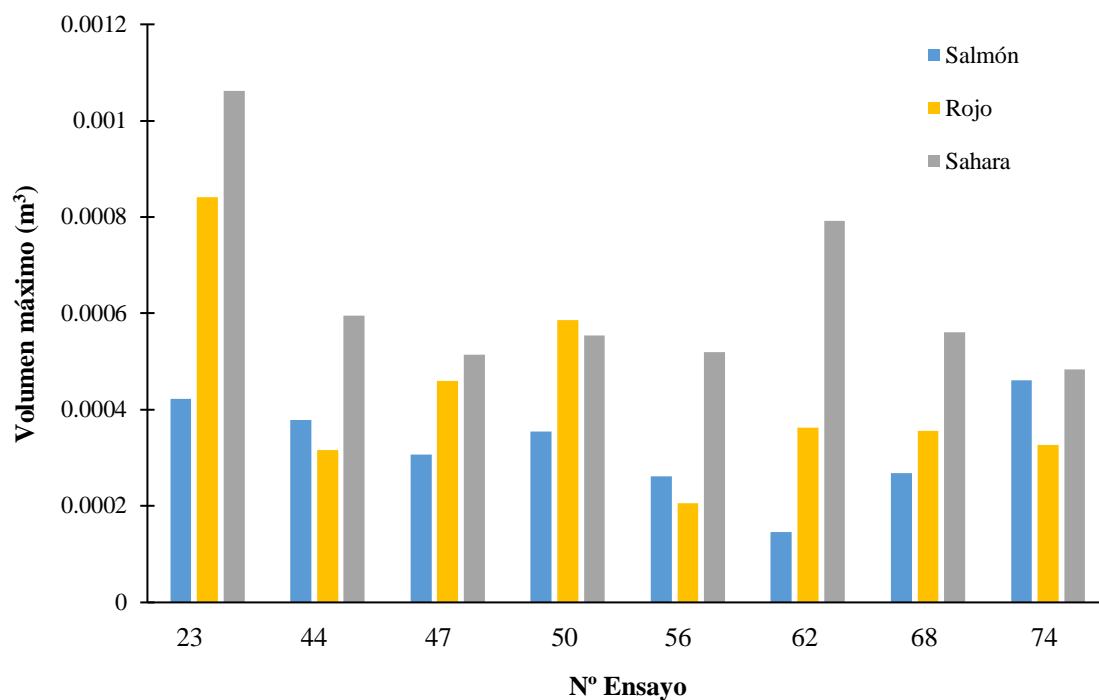
Como ya hemos comentado en el apartado 4.1, se asignaron a los ensayos valores del 0-2 en función del grado de apilamiento de los adoquines durante la caída. Teniendo un valor de 2, aquellos ensayos bien apilados durante la caída e impacto. Se ha visto oportuno, utilizar estos lanzamientos para analizar estadísticamente las diferencias de número de fragmentos (Figuras 57-58) y volumen máximo (Figuras 59-60) entre todos ensayos de 3 y 5 adoquines.



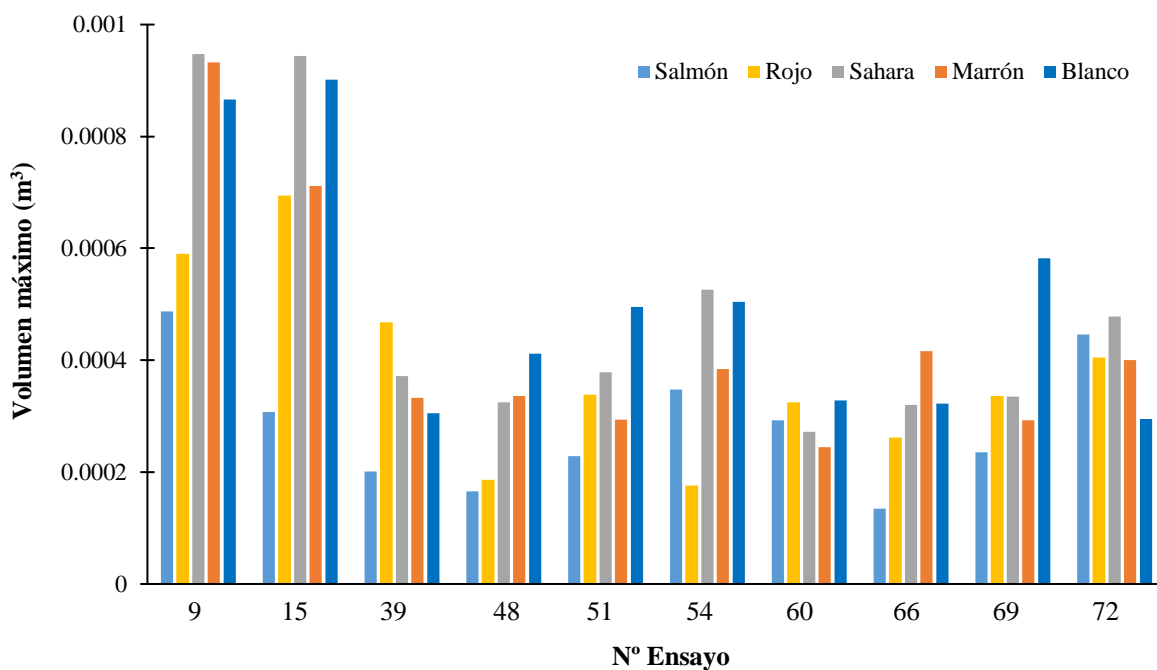
**Figura 57.** Nº de fragmentos para cada ensayo de puntuación 2 en lanzamientos de 3 adoquines.



**Figura 58.** Nº de fragmentos para cada ensayo de puntuación 2 en lanzamientos de 5 adoquines.



**Figura 59.** Volumen máximo (m³) para cada ensayo de puntuación 2 en lanzamientos de 3 adoquines.



**Figura 60.** Volumen máximo (m³) para cada ensayo de puntuación 2 en lanzamientos de 5 adoquines.

## 6. Conclusiones

Los ensayos a escala reducida han contribuido al estudio de la dinámica de fragmentación en los procesos de desprendimientos de rocas, caracterizando el fenómeno de la fragmentación y de la conminución. Dichos ensayos han proporcionado datos y parámetros que posteriormente se incorporarán en la base de datos del modelo de fragmentación (Ruiz-Carulla 2015) y del modelo de propagación RockGIS (Matas et al. 2017).

Dentro del marco conceptual de los Proyectos RockRisk y RockModels se han realizado ensayos de conminución que han permitido el estudio de la influencia del confinamiento en el momento de impacto. Se han utilizado adoquines de diferentes colores para obtener las distribuciones granulométricas resultantes de la fragmentación, en base a la variación del número de fragmentos y el volumen máximo.

En el trabajo se expone el diseño, el procedimiento seguido en los ensayos y los medios de registro de datos utilizados. Se han utilizado técnicas de fotogrametría y videogrametría las cuales han permitido caracterizar el grado de apilamiento de cada ensayo. También estas técnicas están permitiendo a otros autores estudiar los ángulos de impacto y crear modelos 3D de los depósitos.

El post-procesado de datos en el laboratorio, se ha basado en el sistema de captación semiautomático (Matas 2018) incorporado en la programación PYTHON. Se presenta como una herramienta muy innovadora y eficaz para la caracterización de depósitos de desprendimientos de roca de pequeña y media escala. Permite una reducción del tiempo, y un aumento de la precisión durante el proceso de medición de fragmentos.

Las distribuciones granulométricas han dado resultados concluyentes en el estudio de la influencia del confinamiento durante el proceso de conminución. Han confirmado la hipótesis inicial propuesta, que exponía que aquellos bloques sometidos a un confinamiento mayor generan mayor número de fragmentos disminuyendo su volumen máximo. Los resultados mínimos y máximos del número de fragmentos y de los

volúmenes ( $\text{m}^3$ ) obtenidos en cada tipo de lanzamiento, se han indicado en las Tablas 6-7-8.

Los valores de los lanzamientos individuales expuestos en la Tabla 6, están relacionados directamente con la densidad de cada color de adoquín. El número de fragmentos mínimo más alto corresponde al Sahara ( $1.8 \text{ g/cm}^3$ ) y el más bajo corresponde al Salmón ( $2.09 \text{ g/cm}^3$ ). El número de fragmentos y el volumen máximo obtenido para el color Rojo es más elevado de la media de todos los ensayos individuales para este color. Para comprobar esta anomalía se han calculado los valores medios del número de fragmentos para cada color, dando valores de 40 para el Rojo, 80 para el Salmón y 110 para el Sahara.

**Tabla 6.** Valores mínimos y máximos del N° Fragmentos- Volumen ( $\text{m}^3$ ) en lanzamientos individuales.

Color	Salmón		Rojo		Sahara	
Valor	N° Fragmentos	Volumen ( $\text{m}^3$ )	N° Fragmentos	Volumen ( $\text{m}^3$ )	N° Fragmentos	Volumen ( $\text{m}^3$ )
Mínimo	14	0.0002863	7	0.0001866	43	0.0003581
Máximo	139	0.0006666	143	0.0009526	170	0.0009262

En la Tabla 7 se indican los valores de los lanzamientos de 3 adoquines, donde se observa perfectamente el aumento del número de fragmentos y la disminución del volumen máximo a medida que se incrementa el confinamiento. En la Tabla 8 se indican los valores de los lanzamientos de 5 adoquines en los cuales se observa la variación significativa entre los valores máximos y mínimos de los adoquines de color Salmón y los de color Blanco (situados en la parte inferior y superior respectivamente).

En comparación con los ensayos de 3 lanzamientos, los valores de fragmentos obtenidos en los ensayos de 5 lanzamientos son más elevados y los volúmenes máximos son inferiores. Por ejemplo, el volumen máximo del color Rojo varía de  $0.008411 \text{ m}^3$  (3 adoquines) a  $0.0001762 \text{ m}^3$  (5 adoquines) y los valores máximos del número de fragmentos aumentan de 168 a 307.

**Tabla 7.** Valores mínimos y máximos del N° Fragmentos- Volumen (m<sup>3</sup>) en lanzamientos de 3 adoquines.

Color	Salmón		Rojo		Sahara	
Valor	N° Fragmentos	Volumen (m <sup>3</sup> )	N° Fragmentos	Volumen (m <sup>3</sup> )	N° Fragmentos	Volumen (m <sup>3</sup> )
Mínimo	191	0.0001455	38	0.0002061	10	0.0004843
Máximo	374	0.00046	168	0.0008411	100	0.0010617

**Tabla 8.** Valores mínimos y máximos del N° Fragmentos- Volumen (m<sup>3</sup>) en lanzamientos de 5 adoquines.

Color	Salmón		Rojo		Sahara		Marrón		Blanco	
Valor	N° Frag.	Vol. (m <sup>3</sup> )	N° Frag.	Vol. (m <sup>3</sup> )	N° Frag.	Vol. (m <sup>3</sup> )	N° Frag.	Vol.(m <sup>3</sup> )	N° Frag.	Vol. (m <sup>3</sup> )
Mínimo	223	0.000488	119	0.0006944	46	0.0009471	5	0.000933	6	0.00092
Máximo	378	0.000135	307	0.0001762	301	0.0002721	174	0.000245	58	0.0002943

Por otro lado, los resultados obtenidos de los ensayos con aplicación de resina *Epoxy* entre los adoquines no se han considerado dado que muchos se han quedado adheridos después del impacto. Esta adherencia ha provocado un aumento de la resistencia que dista considerablemente de la dinámica de fragmentación habitual de los bloques masivos. Se pueden visualizar las curvas granulométricas de los ensayos con *Epoxy* en los Anejos A5.2 y A5.3.

## 6.1 Futuras líneas de investigación.

En este apartado, se pretende abrir nuevas líneas de investigación que faciliten la predicción de la dinámica de bloques de roca durante la caída y en el momento de conminución.

En primer lugar, parece interesante analizar mediante experimentos a escala real o reducida, la influencia de las discontinuidades y/o puentes de roca, en los resultados de blocometría para la obtención del RBSD. Este estudio permitiría pronosticar las diferencias entre las probabilidades de alcance de los fragmentos generados por un bloque desprendido, en función del grado de discontinuidades.

En segundo lugar, otra posible línea abierta sería seguir realizando ensayos a escala real o reducida para mejorar los datos de calibración de los modelos. En concreto, realizar ensayos con materiales naturales que permitan obtener *a priori* coeficientes de restitución válidos para cualquier tipo de escenario. Se recomienda no cesar en la realización de ensayos ya que es la manera más efectiva de completar un análisis de riesgo cuantitativo para la prevención y predicción de desprendimientos de roca.

# Referencias

- Abellán, A., Vilaplana, J.M., Martínez, J. (2006). Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Nuria (Eastern Pyrenees, Spain). *Eng. Geology*, 88, 136-148.
- Agliardi, F., Crosta, G.B. (2003). High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 455-471.
- Asteriou, P., & Tsiambaos, G. (2016). Empirical Model for Predicting Rockfall Trajectory Direction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 49, 927-941.
- Asteriou, P., & Tsiambaos, G. (2018). Effect of impact velocity, block mass and hardness on the coefficients of restitution for rockfall analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 106, 41- 50
- Azzoni, A., Barbera, G.L., Zaninetti, A. (1995). Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech, Elsevier Science Ltd.* Great Britain, 32 (8), 709-724.
- Berger, F. & Dorren, L.K.A. (2006). Objective comparison of rockfall models using real size experimental data. *International Symposium of disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslide*, 245-252.
- Bourrier, F., Dorren, L., Nicot, F., Berger, F., Darve, F. (2009). Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model. *Geomorphology*, 110, 68-79.
- Bourrier, F., Berger, F., Tardif P, Dorren, L., Hungr, O. (2012). Rockfall rebound: comparison of detailed field experiments and alternative modelling approaches. *Earth Surf. Process Landf.*, 37, 656-665.
- Chau, K., T., Wong, R. H. C., Wu, J. J. (2002). Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(1),69-77.
- Corominas, J. & Mavrouli, O. (2011). Rockfall Quantitative Risk Assessment, Chapter 8. In: Lambert, S. and F. Nicot (eds), *Rockfall engineering*: 255-301. London: ISTE Ltd & John Wiley and Sons, Inc.
- Corominas, J., Mavrouli, O., Santana, D., Moya, J. (2012). Simplified approach for obtaining the block volume distribution of fragmental rockfalls. *XI International Symposium on Landslides*, Banff, Canada.
- Corominas, J., Mavrouli, O., Moya, J., Ruiz, R. (2013). Metodología para la evaluación cuantitativa del riesgo por desprendimiento de rocas a escala específica y local. En: E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.). *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Palma de Mallorca. 566-577.
- Corominas, J., Ruiz-Carulla, R., Matas, G. (2018). Quantitative analysis of risk from fragmental rockfalls. *Landslides*, 16, 5-21.



- Dewez, T., Nachbaur, A., Mathon, C., Sedan, O., Kobayashi, H., Riviere, C., Berger, F., Des Garets, E., Nowak, E. (2010). OFAI: 3D block training in a real size rockfall experiment on a weathered volcanic rocks clope of Tahiki, French Polynesia. *Proceeding of rock slope Stability 2010*. Paris, France.
- Dorren, L., Maier, B., Putters, S., Seijmonsbergen, C. (2003). Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. *Geomorphology*, 57, 151-167.
- Dorren, L., Berger, F., Putters, U.S. (2006). Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6, 145–153.
- Fookes, P.G. & Sweeney M. (1976). Stabilization and control of local rock falls and degrading rock slopes, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 9, 37-55.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C.H., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z. (2008). on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng Geol* 102, 85–98.
- Giacomini, A., Buzzi, O., Renard, B., Giani, G. P. (2009). Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(4), 708-715.
- Giacomini, A., Thoeni, K., Lambert, C., Booth, S., Sloan, S. (2012). Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 171–181.
- Gili, J.A., Ruiz-Carulla, R., Matas, G., Corominas, J., Lantada, N.; Núñez, M.A., Mavrouli, O., Buill, F., Moya, J., Prades, A. Moreno, S. (2016). Experimental study on rockfall fragmentation: in situ test design and firsts results. *XII International Symposium on Landslides*. Naples, Italy.
- Gischig, V., Hungr, O., Mitchell, A., Bourrier, F. (2015) Pierre3D: a 3D stochastic rockfall simulator based on random ground roughness and hyperbolic restitution factors. *Canadian Geotechnical Journal* 52, 1–14.
- Klette, J. & Volkwein, A. (2013). Semi-automatic determination of rockfall trajectories. *Sensors*, 14(10), 18187-18210.
- Labiouse V. & Abruzzesse O. (2011). Rockfall Hazard Zoning for Land Use Planning, Chapter 7. In: Lambert, S. and F. Nicot (eds), *Rockfall engineering*, 211-253. London: ISTE Ltd & John Wiley and Sons, Inc.
- Ma, G.C., Matsuyama, H., Nishiyama, S., Ohnishi, Y. (2011). Practical studies on rockfall simulation by DDA. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3(1), 57–63
- Matas, G., Lantada, N., Gili, J.A., Corominas, J. (2016). Simulation of rockfall fragmentation mechanism in GIS-based tool. *ISRM International Symposium "EUROCK 2016"*. Cappadocia, Turquia.
- Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J.A., Prades, A. (2017). ROCKGIS: A GIS-based model for the analysis of fragmentation in rockfalls. *Landslides*, 14(5), 1565-1578.
- Pina, L. (2008) *Quantitative risk assessment of rockfall hazard in the amalfi coastal road*. (Tesis Doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya.

- Ruiz-Carulla, R., Corominas, J., Mavrouli, O. (2015<sup>a</sup>). A methodology to obtain the block size distribution of fragmental rockfall deposits. *Landslides*, 12(4), 815-825.
- Ruiz-Carulla, R., Corominas, J. and Mavrouli, O. (2015<sup>b</sup>). An empirical approach to rockfall fragmentation. *EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium*, Schubert (ed).
- Ruiz-Carulla, R., Corominas, J. and Mavrouli, O. (2016<sup>a</sup>). A fractal fragmentation model for rockfalls. *Landslides*, 14(3), 875-889.
- Ruiz-Carulla, R., (2018). *Rockfall Analysis: Failure, fragmentation and propagation characterization* (Tesis Doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ritchie, A.M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway research board record*, 17. Washington.
- Spadari, M., Giacomini, A., Buzzi, O., Fityus, S., Giani, G.P. (2012). In situ rockfall testing in New South Wales, Australia. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 49, 84–93.
- Stevens & Warren, D. (1998). "*RockFall: A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls*". (Thesis). Department of Civil Engineering, University of Toronto, Ontario, Canada.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Bergers, F., Bourrier, F., Dorren, A., Gerber, W., Jaboyedoffs, M. Rockfall characterization and structural protection. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11, 2617-2651.
- Wang, Y., Tonon, F. (2010). Discrete Element Modelling of Rock Fragmentation upon Impact in Rock Fall Analysis. *Rock Mech. & Rock Eng*, 44, 23–35.

# Anexos

## A1. Resultados de los ensayos de compresión simple y de tracción.

**Tabla 1.** Propiedades obtenidas en el ensayo de compresión simple.

Propiedades	Salmón (1)	Rojo (2)	Sahara (3)	Marrón (4)	Blanco (5)
Diámetro (cm)	4.23	4.24	4.24	4.24	4.24
Altura (cm)	8.52	8.26	8.68	8	8.56
Sección (cm <sup>2</sup> )	14.5	14.11	14.11	14.11	14.11
Volumen (cm <sup>3</sup> )	119.67	116.57	122.5	112.9	120.8
T +S (g)	249.47	261.3	221.39	253.78	259.45
Densidad seca (g/ cm <sup>3</sup> )	2.8	2.24	1.81	2.25	2.15
Carga de rotura (kN)	85.54	46.09	31	137.5	49.94
Resistencia compresión (MPa)	60.90	32.66	21.97	97.43	35.39
Módulo de Young (MPa)	52573.3	84741	7304.1	76718.1	33171.4
Coefficiente de Poisson	0.08	0.43	0.02	0.54	0.35

**Tabla 2.** Propiedades obtenidas en el ensayo de tracción indirecta o Ensayo Brasileño

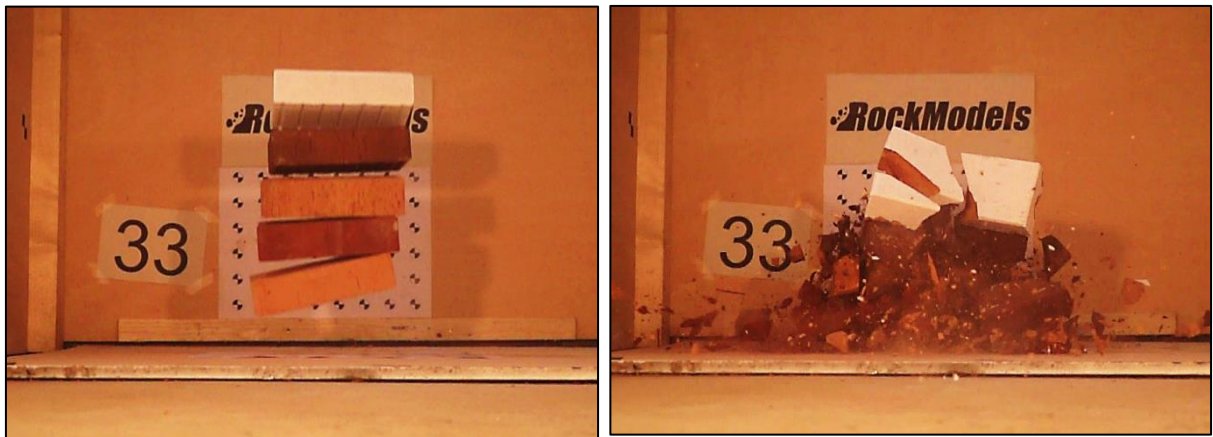
Propiedades	Salmón (1)	Rojo (2)	Sahara (3)	Marrón (4)	Blanco (5)
Diámetro (cm)	7.45	7.46	7.46	7.46	7.46
Altura (cm)	4.92	4.6	5.14	4.75	4.8
Sección (cm <sup>2</sup> )	43.57	43.69	43.69	43.69	43.69
Volumen (cm <sup>3</sup> )	214.36	200.96	224.55	207.51	209.7
T +S (g)	455.27	466.9	411.24	476.72	454.45
Densidad seca (g/ cm <sup>3</sup> )	2.12	2.32	1.83	2.30	2.17
Resistencia tracción (MPa)	2.181	13.884	12.758	11.258	7.808

## A2. Registro manual de los ensayos de conminución.

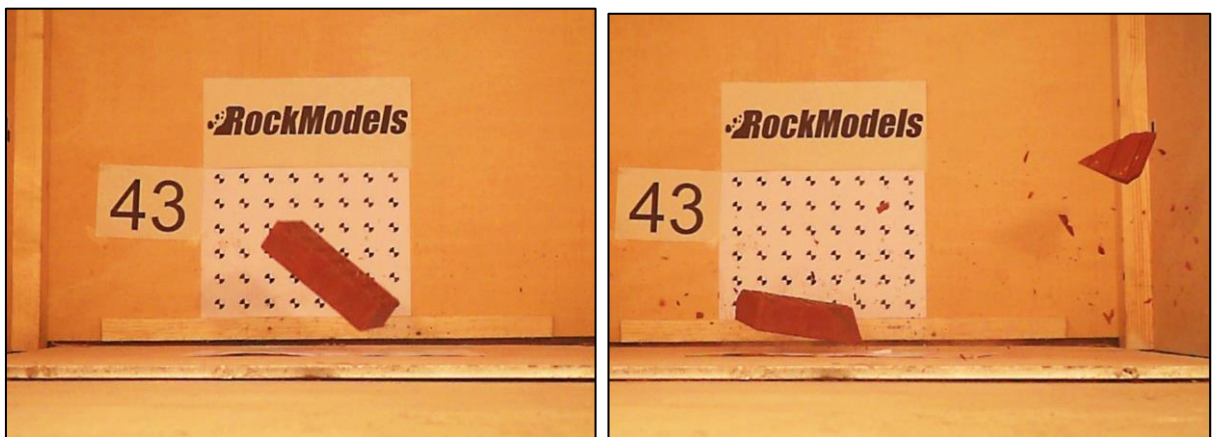
ID_L	Nº Adoquines	Día de ensayo	Hora lanz.	Unión adoquines	Sistema lanz.	ISO/ Shotter	Pond. apilamiento
1	1	12/12/2018	9.45 h	-	Dispositivo	800 1/1000	-
2	3	12/12/2018	10.00 h	-	Dispositivo	800 1/1000	0
3	5	12/12/2018	10.15 h	-	Dispositivo	800 1/1000	0
4	1	12/12/2018	10.40 h	-	Dispositivo	800 1/1000	-
5	3	12/12/2018	10.53 h	cinta adhesiva	Dispositivo	800 1/1000	0
6	5	12/12/2018	11.10 h	cinta adhesiva	Dispositivo	800 1/1000	1
7	1	12/12/2018	11.45 h	-	Dispositivo	800 1/1000	-
8	3	12/12/2018	11.56 h	cinta adhesiva	Dispositivo	800 1/1000	0
9	5	12/12/2018	12.12 h	cinta adhesiva	Dispositivo	1600 1/2500	2
10	1	12/12/2018	12.28 h	-	Dispositivo	1600 1/2500	-
11	3	12/12/2018	12.45 h	cinta adhesiva	Dispositivo	1600 1/2500	0
12	5	12/12/2018	12.58 h	cinta adhesiva	Dispositivo	1600 1/2500	0
13	1	12/12/2018	13.15 h	-	Dispositivo	1600 1/2500	-
14	3	12/12/2018	13.25 h	cinta adhesiva	Dispositivo	1600 1/2500	1
15	5	12/12/2018	13.40 h	cinta adhesiva	Dispositivo	1601 1/2500	2
16	1	12/12/2018	15.46 h	-	Dispositivo	1602 1/2500	-
17	3	12/12/2018	16.04 h	-	Dispositivo	1603 1/2500	2
18	5	12/12/2018	16.20 h	-	Dispositivo	1604 1/2500	0
19	1	12/12/2018	16.34 h	-	Dispositivo	1605 1/2500	-
20	3	12/12/2018	16.46 h	-	Dispositivo	1606 1/2500	0
21	5	12/12/2018	17.01 h	-	Dispositivo	1607 1/2500	0
22	1	12/12/2018	17.22 h	-	Dispositivo	1608 1/2500	-
23	3	12/12/2018	17.37 h	cinta adhesiva	Dispositivo	1609 1/2500	2
24	5	12/12/2018	17.54 h	-	A mano	1610 1/2500	1
25	1	12/12/2018	18.09 h	-	A mano	1611 1/2500	-
26	3	12/12/2018	18.22 h	-	A mano	1612 1/2500	1
27	5	12/12/2018	18.38 h	-	A mano	1613 1/2500	1
28	1	12/12/2018	18.50 h	-	A mano	1614 1/2500	-
29	3	12/12/2018	19.02 h	-	A mano	1615 1/2500	0
30	5	12/12/2018	19.16 h	-	A mano	1616 1/2500	1
31	1	12/12/2018	19.30 h	-	A mano	1617 1/2500	-
32	3	12/12/2018	19.46 h	-	A mano	1618 1/2500	1
33	5	12/12/2018	20.00 h	-	A mano	1619 1/2500	1
34	1	13/12/2018	10.19 h	-	A mano	1600 1/1750	-
35	3	13/12/2018	10.34 h	-	A mano	1601 1/1750	0
36	5	13/12/2018	10.54 h	-	A mano	1602 1/1750	1
37	1	13/12/2018	11.10 h	-	A mano	1603 1/1750	-
38	3	13/12/2018	11.21 h	-	A mano	1604 1/1750	/
39	5	13/12/2018	11.36 h	-	A mano	1605 1/1750	2
40	1	13/12/2018	11.53 h	-	A mano	1606 1/1750	-
41	3	13/12/2018	12.04 h	-	A mano	1607 1/1750	1
42	5	13/12/2018	12.15 h	-	A mano	1608 1/1750	1
43	1	13/12/2018	12.33 h	-	A mano	1609 1/1750	-
44	3	13/12/2018	12.43 h	-	A mano	1610 1/1750	2
45	5	13/12/2018	12.55 h	-	A mano	1611 1/1750	1
46	1	13/12/2018	13.10 h	-	A mano	1612 1/1750	-
47	3	13/12/2018	13.22 h	-	A mano	1613 1/1750	2
48	5	13/12/2018	13.33 h	-	A mano	1614 1/1750	2
49	1	13/12/2018	13.50 h	-	A mano	1615 1/1750	-
50	3	13/12/2018	15.24 h	-	A mano	1616 1/1750	2
51	5	13/12/2018	15.40 h	-	A mano	1617 1/1750	2
52	1	13/12/2018	15.54 h	-	A mano	1618 1/1750	-
53	3	13/12/2018	16.06 h	-	A mano	1619 1/1750	1
54	5	13/12/2018	16.19 h	-	A mano	1620 1/1750	2
55	1	13/12/2018	16.34 h	-	A mano	1621 1/1750	-
56	3	13/12/2018	16.45 h	-	A mano	1622 1/1750	2
57	5	13/12/2018	16.58 h	-	A mano	1623 1/1750	1
58	1	13/12/2018	17.13 h	-	A mano	1624 1/1750	-
59	3	13/12/2018	17.24 h	-	A mano	1625 1/1750	0
60	5	13/12/2018	17.44 h	-	A mano	1626 1/1750	2
61	1	13/12/2018	18.08 h	-	A mano	1627 1/1750	-
62	3	13/12/2018	18.15 h	-	A mano	1628 1/1750	2
63	5	13/12/2018	18.33 h	-	A mano	1629 1/1750	1
64	1	13/12/2018	18.49 h	-	A mano	1630 1/1750	-
65	3	13/12/2018	19.00 h	-	A mano	1631 1/1750	2
66	5	13/12/2018	19.13 h	-	A mano	1632 1/1750	2
67	1	13/12/2018	19.30 h	-	A mano	1633 1/1750	-
68	3	13/12/2018	19.42 h	-	A mano	1634 1/1750	2
69	5	13/12/2018	19.56 h	-	A mano	1635 1/1750	2
70	1	13/12/2018	20.15 h	-	A mano	1636 1/1750	-
71	3	14/12/2018	8.38 h	-	A mano	1637 1/1750	0
72	5	14/12/2018	8.55 h	-	A mano	1638 1/1750	2
73	1	14/12/2018	9.05 h	-	A mano	1639 1/1750	-
74	3	14/12/2018	9.17 h	-	A mano	1640 1/1750	2

75	3	14/12/2018	9.30 h	Epoxy	A mano	1641 1/1750	0
76	5	14/12/2018	9.42 h	Epoxy	A mano	1642 1/1750	2
77	3	14/12/2018	9.56 h	Epoxy	A mano	1643 1/1750	2
78	5	14/12/2018	10.05 h	Epoxy	A mano	1644 1/1750	2
79	3	14/12/2018	10.17 h	Epoxy	A mano	1645 1/1750	2
80	5	14/12/2018	10.32 h	Epoxy	A mano	1646 1/1750	2
81	3	14/12/2018	10.45 h	Epoxy	A mano	1647 1/1750	2
82	5	14/12/2018	10.57 h	Epoxy	A mano	1648 1/1750	0
83	3	14/12/2018	11.10 h	Epoxy	A mano	1649 1/1750	2
84	5	14/12/2018	11.21 h	Epoxy	A mano	1650 1/1750	2
85	3	14/12/2018	11.36 h	Epoxy	A mano	1651 1/1750	2
86	5	14/12/2018	11.46 h	Epoxy	A mano	1652 1/1750	2
87	3	14/12/2018	12.00 h	Epoxy	A mano	1653 1/1750	2
88	5	14/12/2018	12.12 h	Epoxy	A mano	1654 1/1750	2
89	5	14/12/2018	12.29 h	-	A mano	1655 1/1750	2
90	5	14/12/2018	12.42 h	-	A mano	1656 1/1750	1
91	5	14/12/2018	12.55 h	-	A mano	1657 1/1750	2
92	5	14/12/2018	13.09 h	-	A mano	1658 1/1750	2

### A3. *Frames* de los ensayos tratados en el apartado 4 “Resultados”

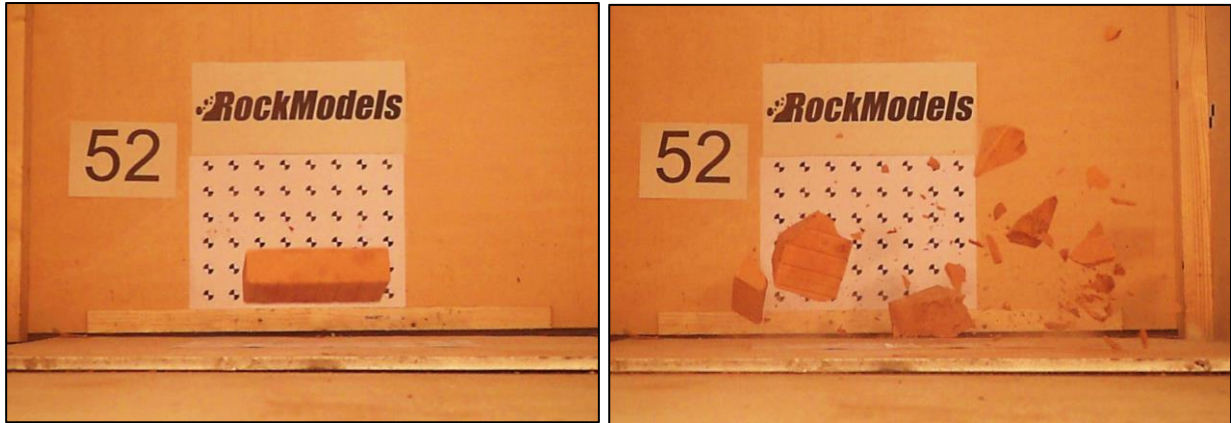


**Figura 1.** Ensayo de conminución n° 33.



**Figura 1.** Ensayo de conminución n° 43.





**Figura 2.** Ensayo de conminución n° 52.



**Figura 3.** Ensayo de conminución n° 55.



**Figura 4.** Ensayo de conminución n° 62.



**Figura 5.** Ensayo de conminución n° 85.



**Figura 6.** Ensayo de conminución n° 88.



**Figura 7.** Ensayo de conminución n° 91.



## **A4. Bandejas con los adoquines clasificados**

### **A4.1 Ensayos individuales**



**Figura 8.** Ensayo de conminución nº 1.



**Figura 9.** Ensayo de conminución nº 4.



**Figura 10.** Ensayo de conminución nº 7.



**Figura 11.** Ensayo de conminución nº 10.



**Figura 12.** Ensayo de conminución nº 13.



**Figura 13.** Ensayo de conminución nº 16.





**Figura 14.** Ensayo de conminución nº 19.



**Figura 15.** Ensayo de conminución nº 22.



**Figura 16.** Ensayo de conminución nº 25.



**Figura 17.** Ensayo de conminución nº 28.



**Figura 18.** Ensayo de conminución nº 31.



**Figura 19.** Ensayo de conminución nº 34.





**Figura 20.** Ensayo de conminución nº 37.



**Figura 21.** Ensayo de conminución nº 40.



**Figura 22.** Ensayo de conminución nº 43.



**Figura 23.** Ensayo de conminución nº 46.



**Figura 24.** Ensayo de conminución nº 49.



**Figura 25.** Ensayo de conminución nº 55.





**Figura 26.** Ensayo de conminución nº 52.



**Figura 27.** Ensayo de conminución nº 58.



**Figura 28.** Ensayo de conminución nº 61.



**Figura 29.** Ensayo de conminución nº 64.



**Figura 30.** Ensayo de conminución nº 67.



**Figura 31.** Ensayo de conminución nº 70.





**Figura 32.** Ensayo de conminución nº 73.

#### A4.2 Ensayos de 3 adoquines.



**Figura 33.** Ensayo de conminución nº 14.



**Figura 34.** Ensayo de conminución nº 17.



**Figura 35.** Ensayo de conminución nº 23.



**Figura 36.** Ensayo de conminución nº 26.





**Figura 37.** Ensayo de conminución n° 29. **Figura 38.** Ensayo de conminución n° 32.



**Figura 39.** Ensayo de conminución n° 44. **Figura 40.** Ensayo de conminución n° 47.



**Figura 41.** Ensayo de conminución n° 50. **Figura 42.** Ensayo de conminución n° 56.





**Figura 43.** Ensayo de conminución nº 62. **Figura 44.** Ensayo de conminución nº 65.



**Figura 45.** Ensayo de conminución nº 68. **Figura 46.** Ensayo de conminución nº 74.



**Figura 47.** Ensayo de conminución nº 76. **Figura 48.** Ensayo de conminución nº 77.





**Figura 49.** Ensayo de conminución n° 79. **Figura 50.** Ensayo de conminución n° 81.



**Figura 51.** Ensayo de conminución n° 83. **Figura 52.** Ensayo de conminución n° 85.



**Figura 53.** Ensayo de conminución n° 87.

#### A4.3 Ensayos de 5 adoquines.



**Figura 54.** Ensayo de conminución nº 6.



**Figura 55.** Ensayo de conminución nº 9.



**Figura 56.** Ensayo de conminución nº





**Figura 57.** Ensayo de conminución nº 24.



**Figura 58.** Ensayo de conminución nº 39.



**Figura 59.** Ensayo de conminución nº 27.





**Figura 60.** Ensayo de conminución n° 48.



**Figura 61.** Ensayo de conminución n° 51.



**Figura 62.** Ensayo de conminución n° 54.





**Figura 63.** Ensayo de conminución n° 60.



**Figura 64.** Ensayo de conminución n° 66.



**Figura 65.** Ensayo de conminución n° 69.





**Figura 66.** Ensayo de conminución nº 72.



**Figura 67.** Ensayo de conminución nº 78.



**Figura 68.** Ensayo de conminución nº 80.





**Figura 69.** Ensayo de conminución n° 82.



**Figura 70.** Ensayo de conminución n° 84.



**Figura 71.** Ensayo de conminución n° 86.





**Figura 72.** Ensayo de conminución nº 88.



**Figura 73.** Ensayo de conminución nº 89.



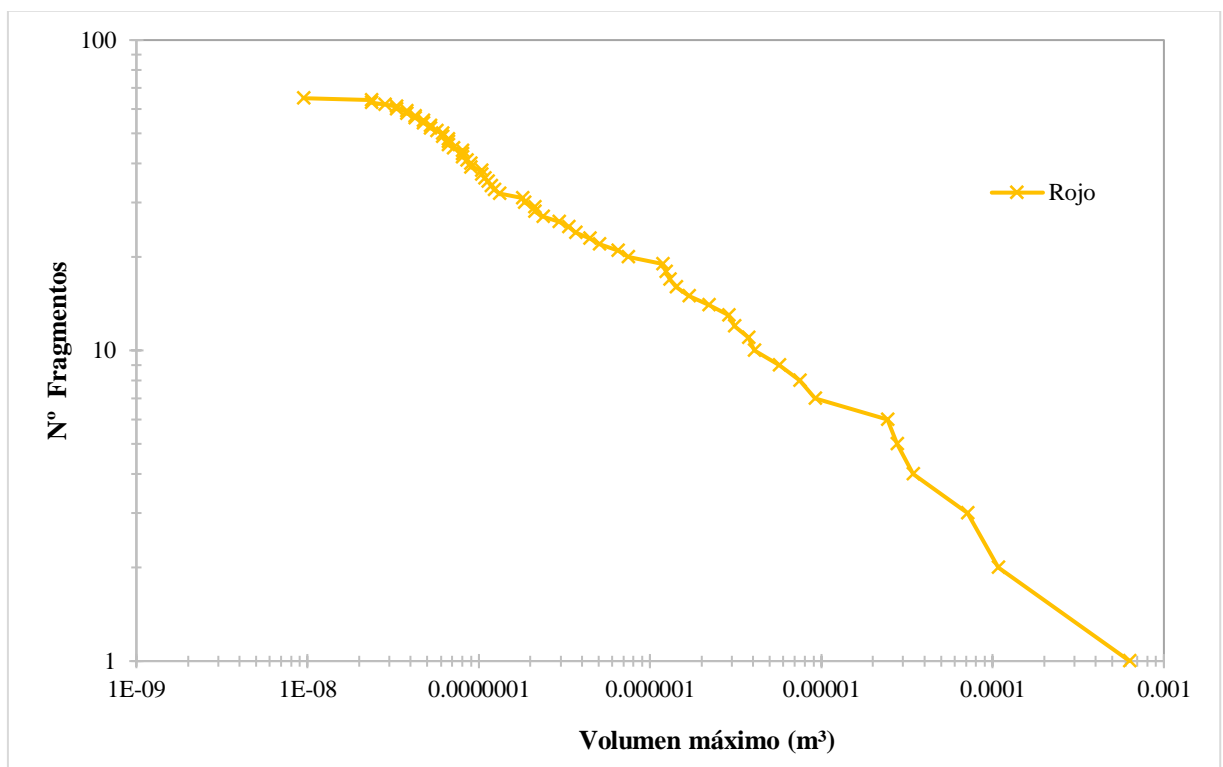
**Figura 74.** Ensayo de conminución nº 91.



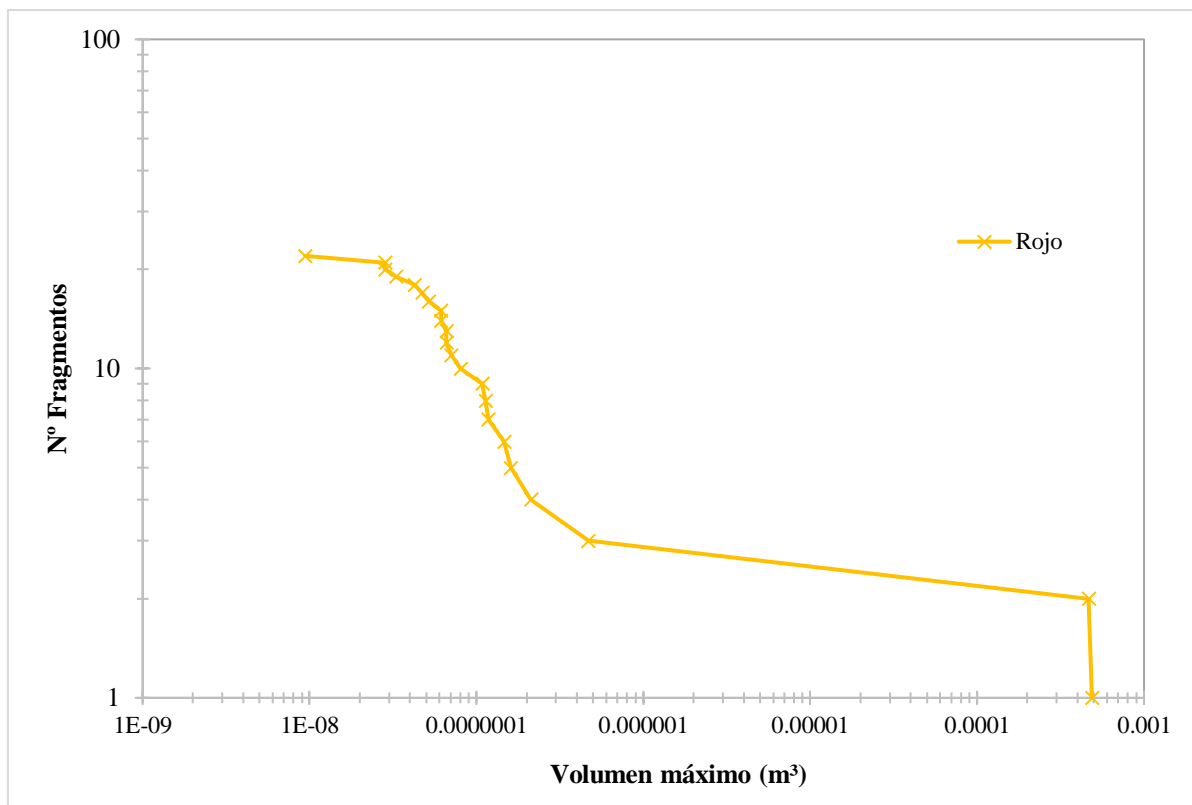
**Figura 75.** Ensayo de conminución nº 92.

## **A5. Curvas granulométricas resultantes.**

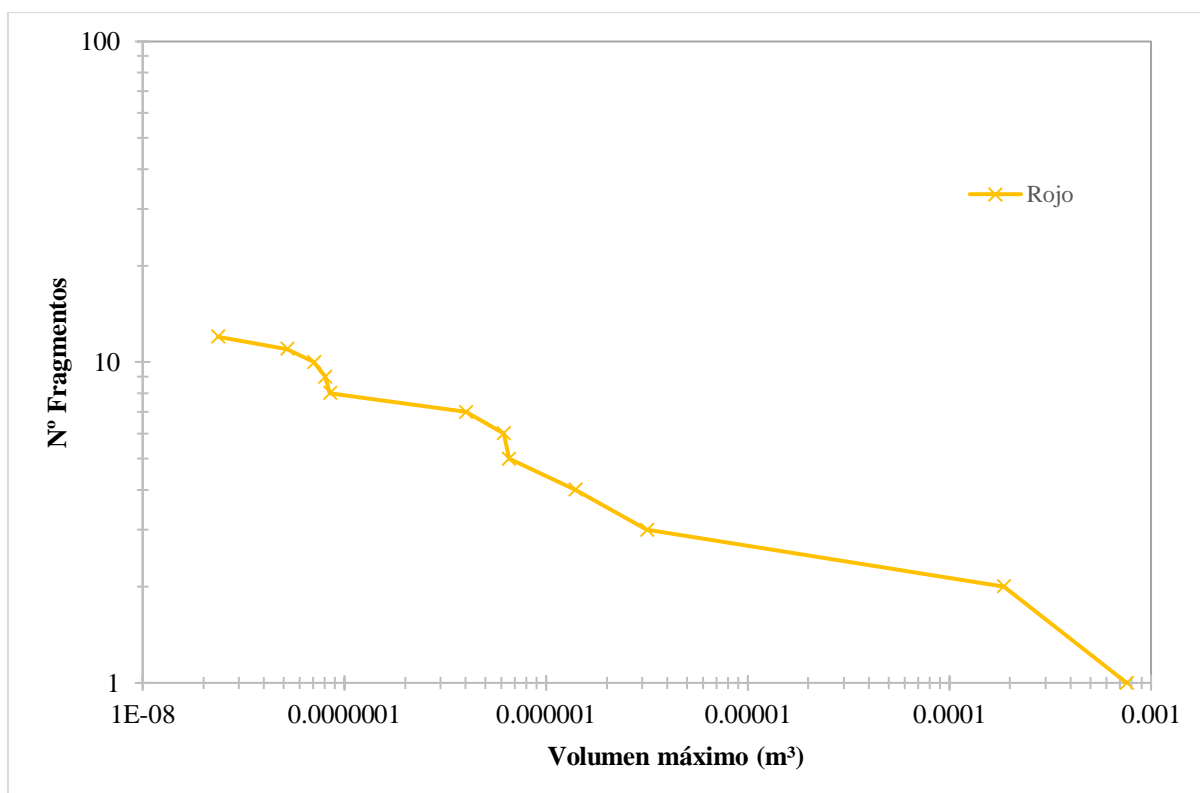
### **A5.1 Ensayos individuales.**



**Figura 76.** Ensayo de conminución nº 1

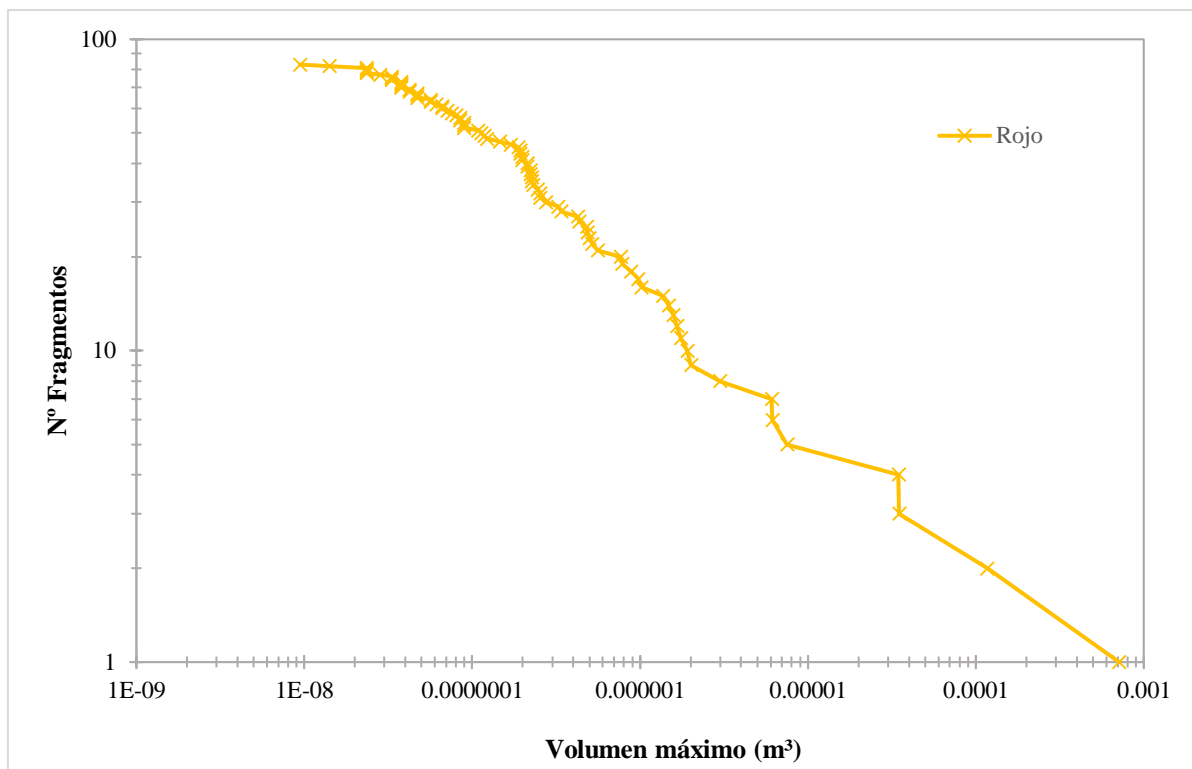


**Figura 77.** Ensayo de conminución nº 4

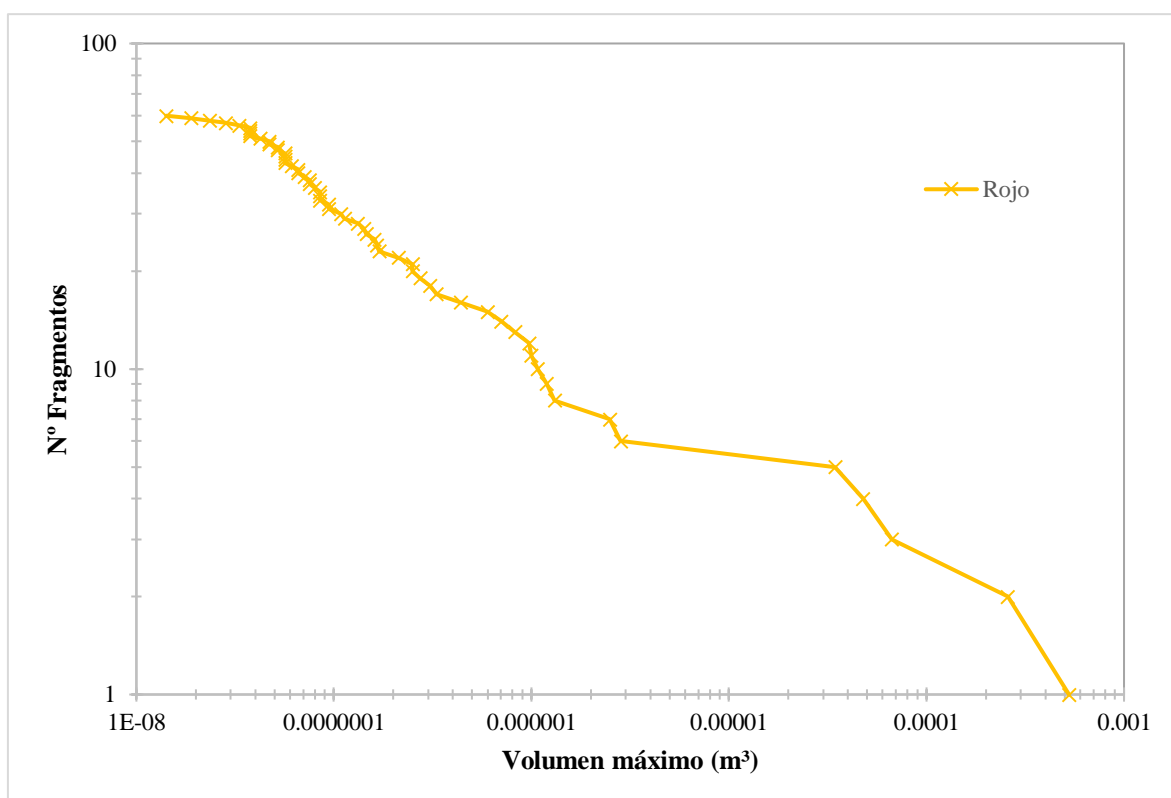


**Figura 78.** Ensayo de conminución nº 7

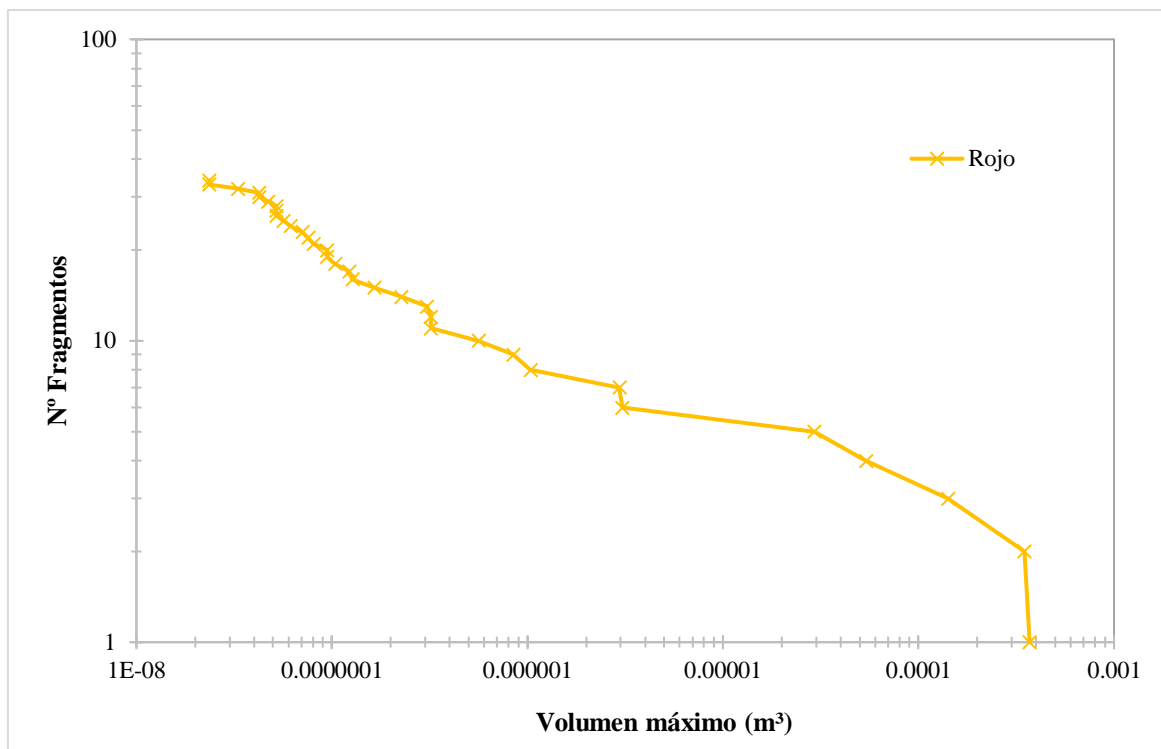




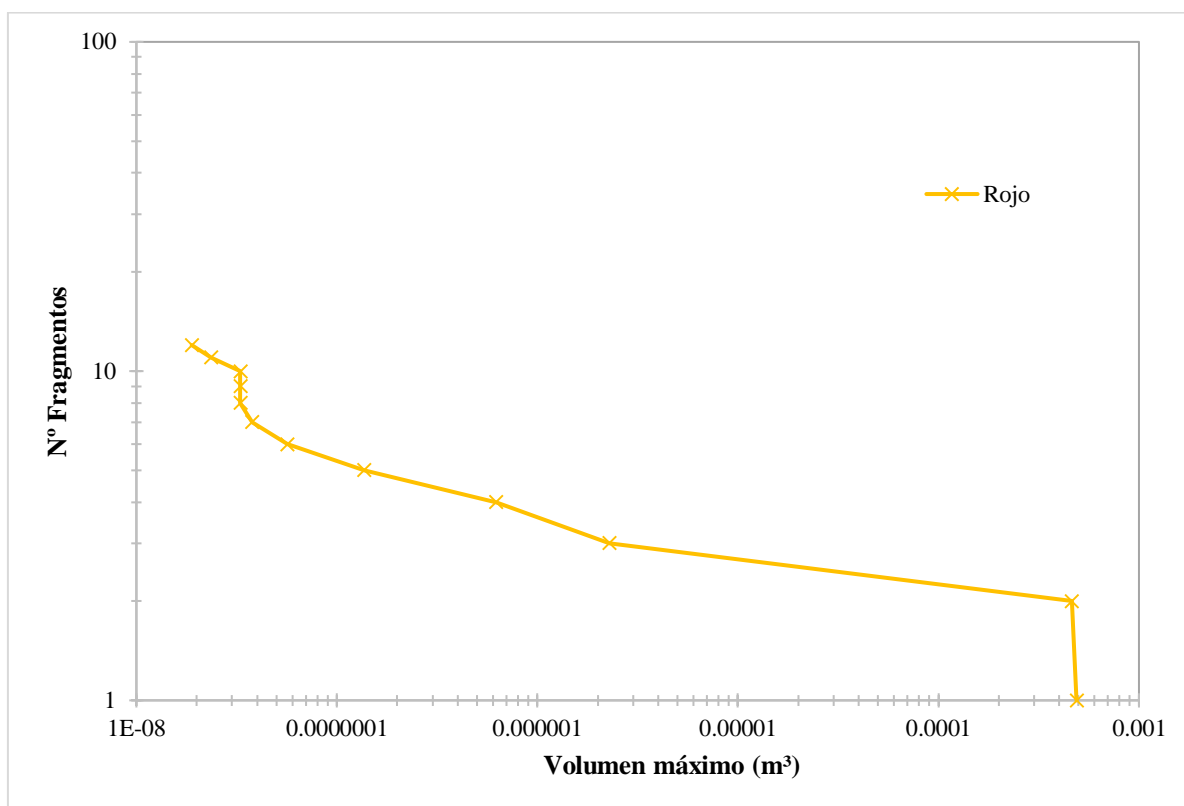
**Figura 79.** Ensayo de conminución nº 10



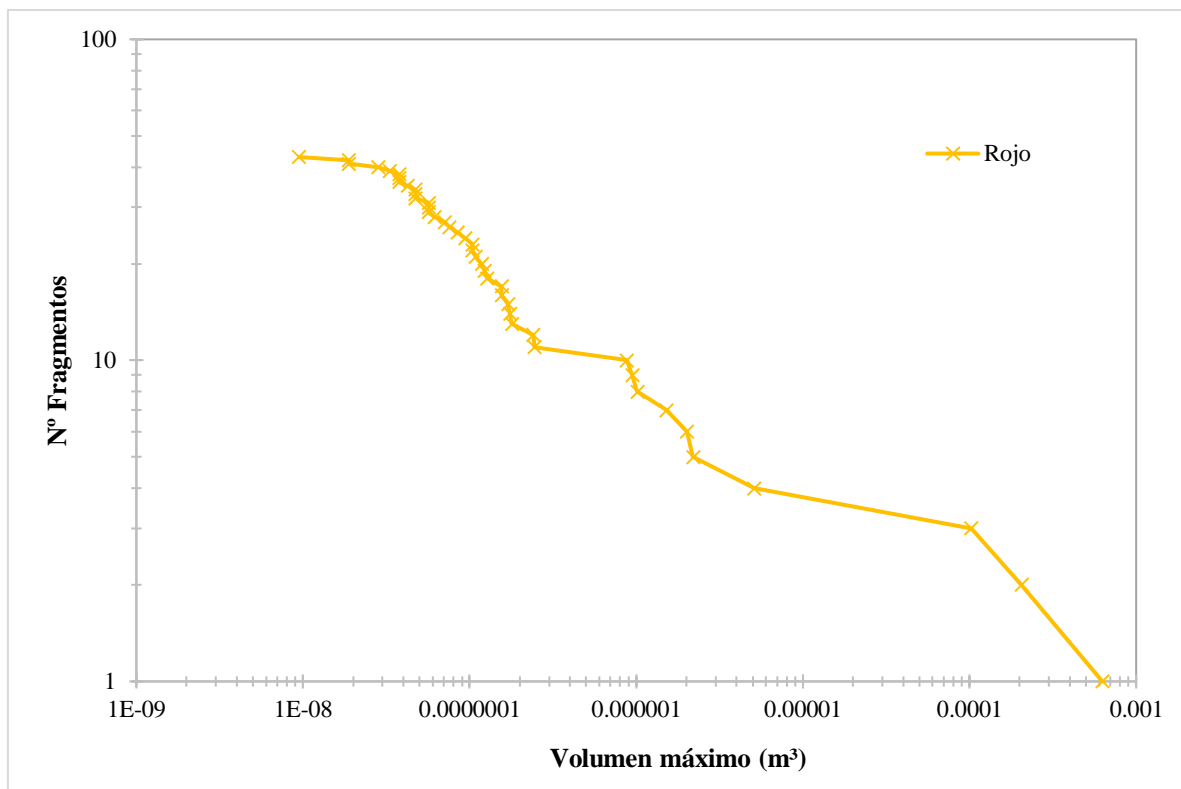
**Figura 80.** Ensayo de conminución nº 13



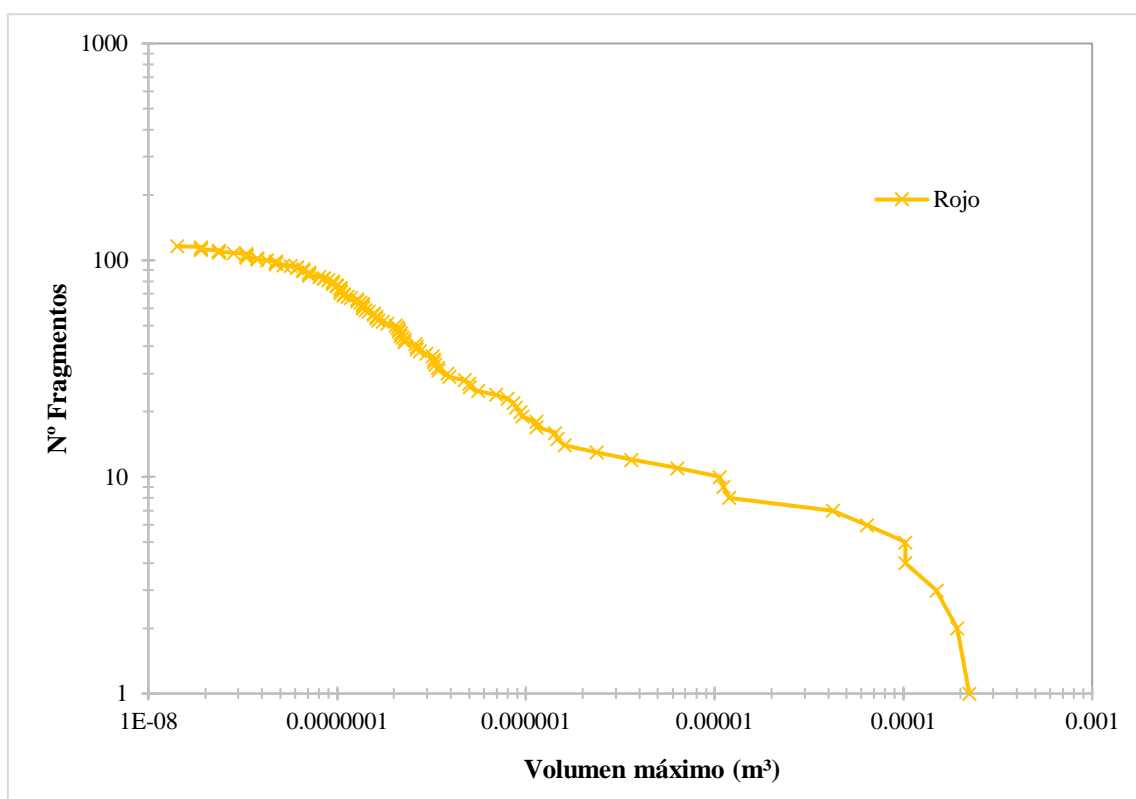
**Figura 81.** Ensayo de conminución n° 16



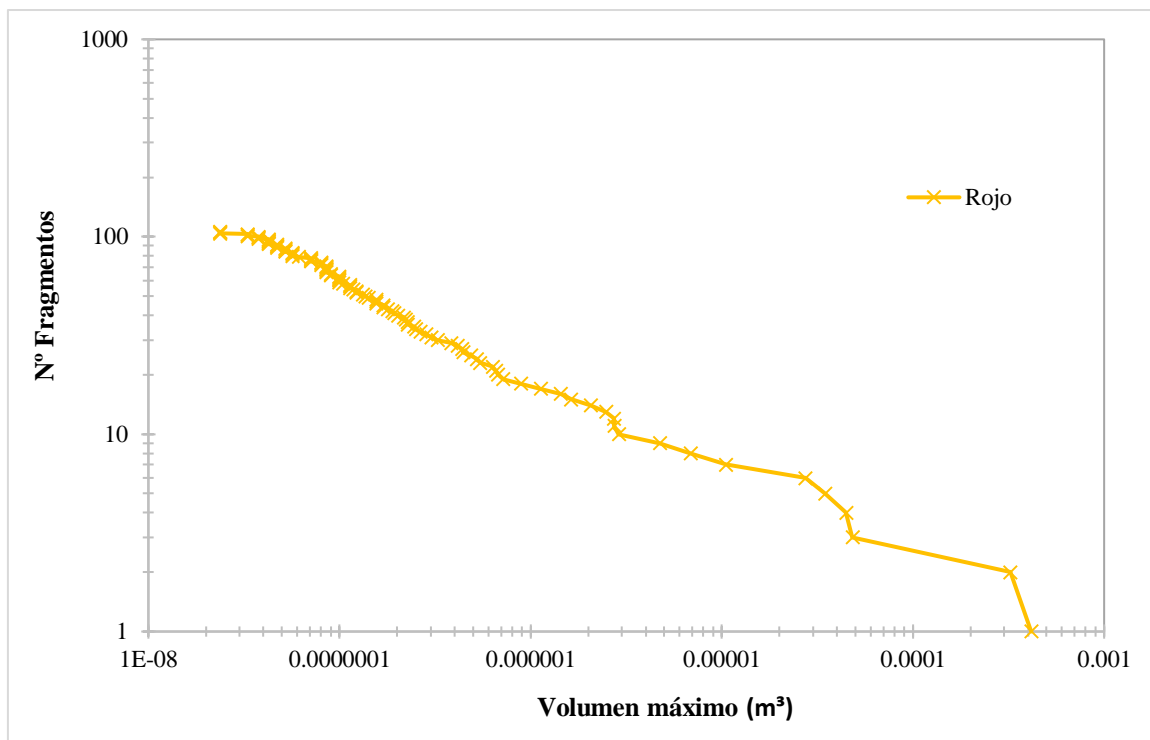
**Figura 82.** Ensayo de conminución n° 19



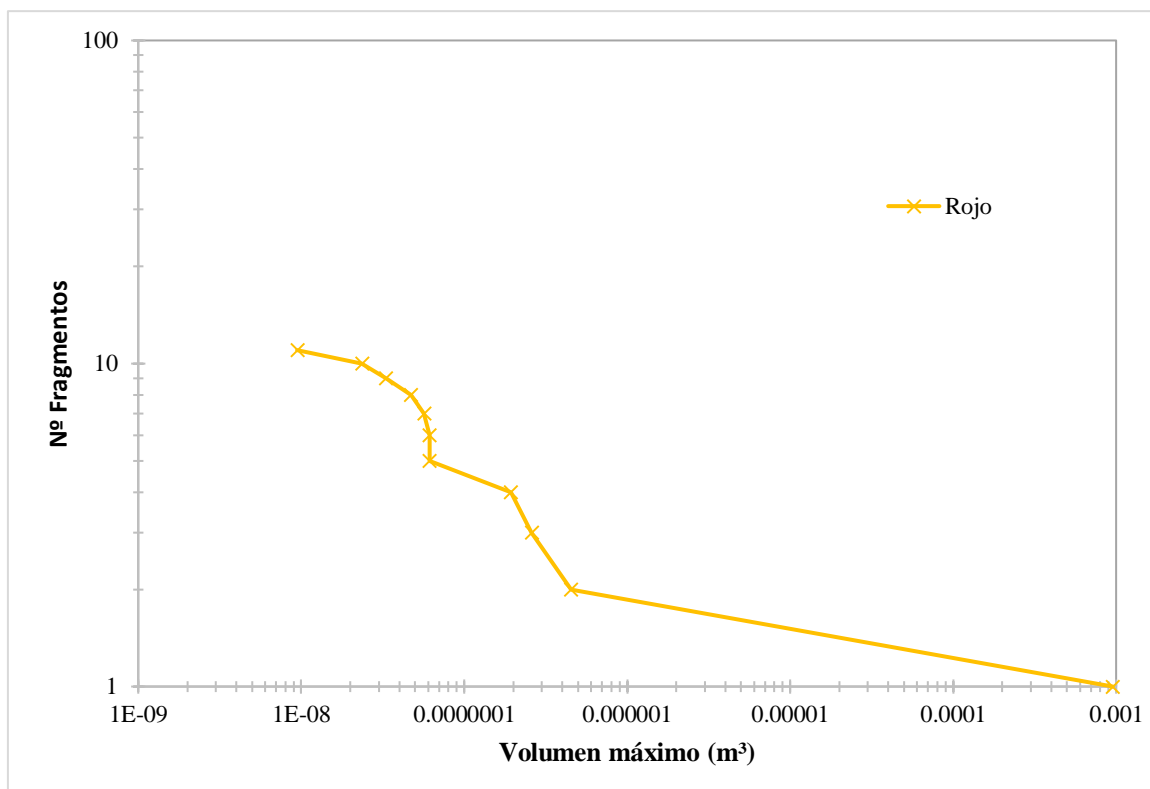
**Figura 83.** Ensayo de conminución nº 22



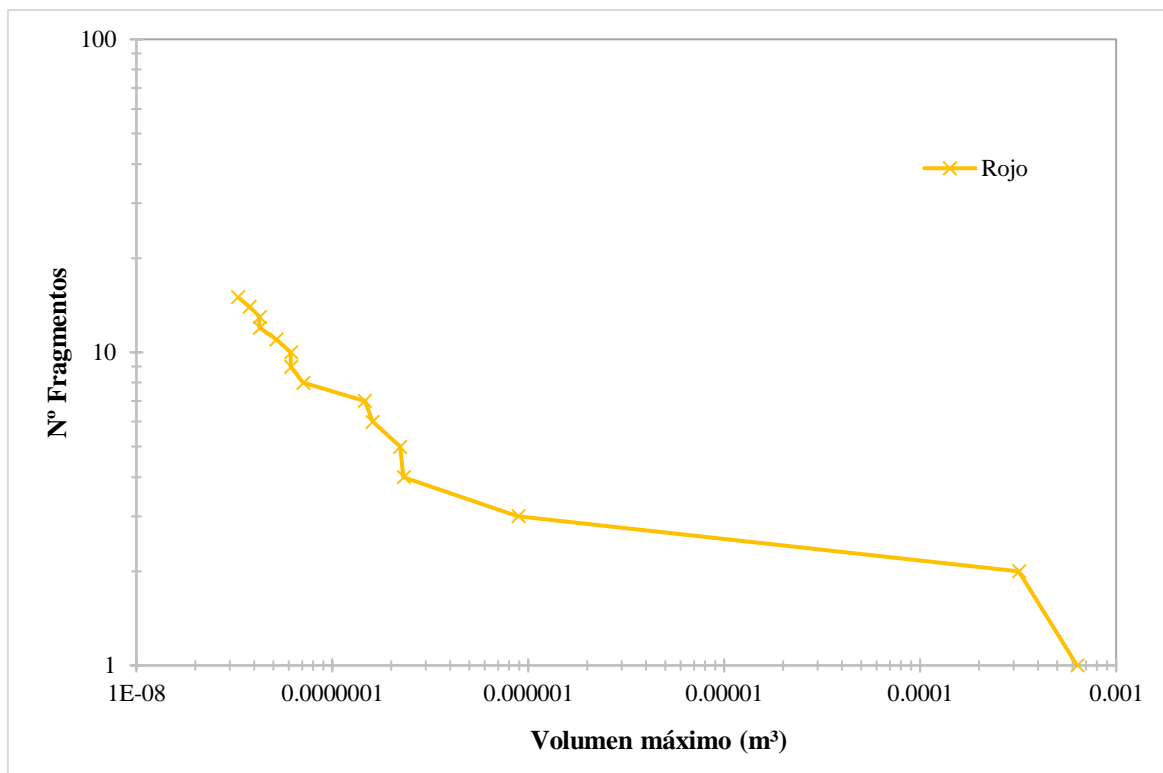
**Figura 84.** Ensayo de conminución nº 25



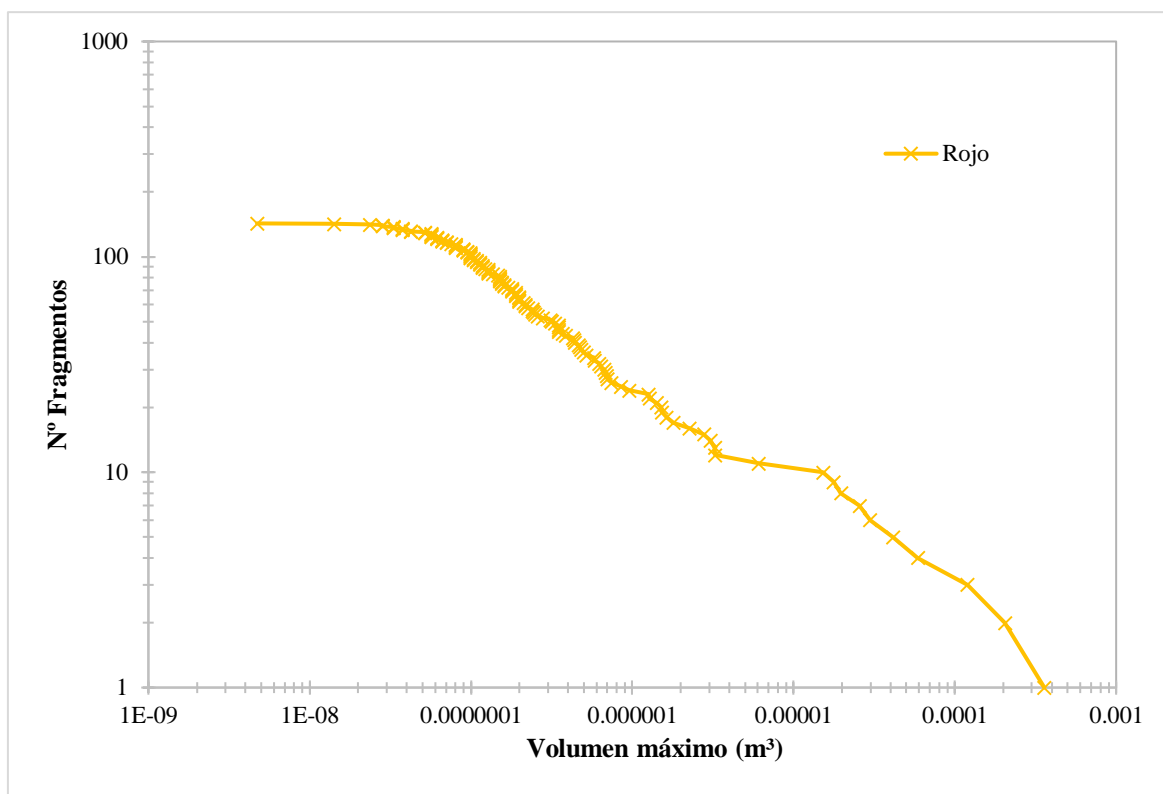
**Figura 85.** Ensayo de conminución nº 28



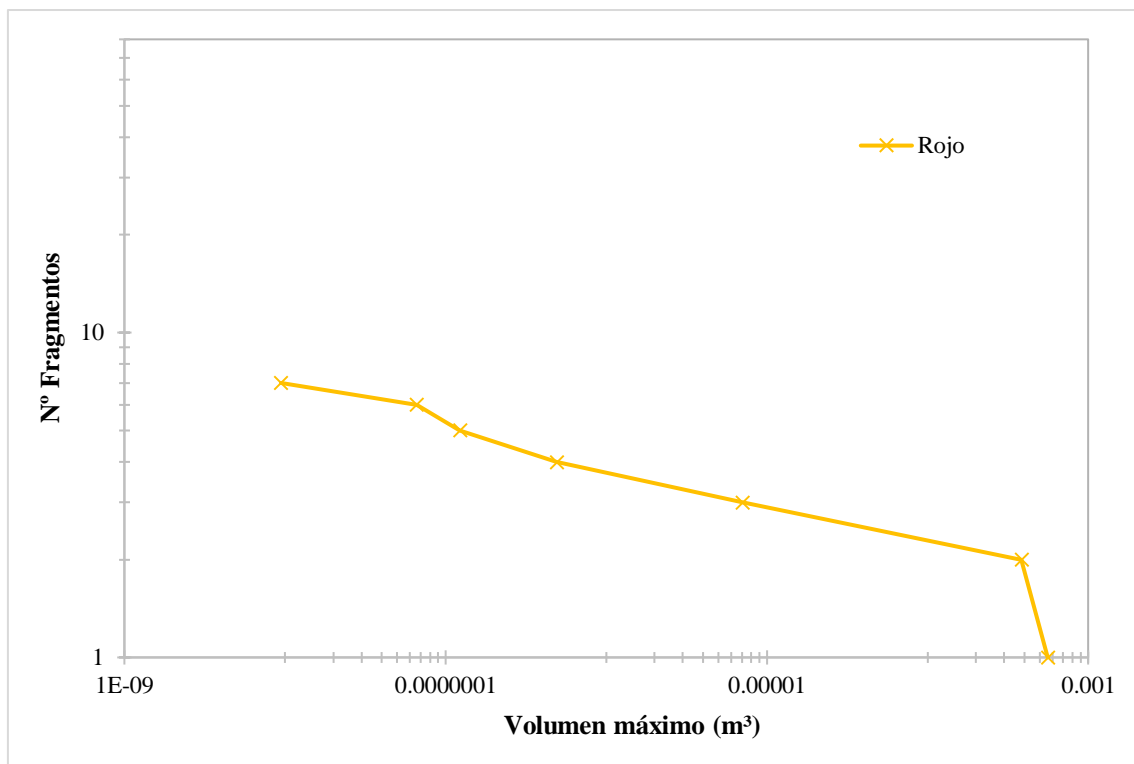
**Figura 86.** Ensayo de conminución nº 31



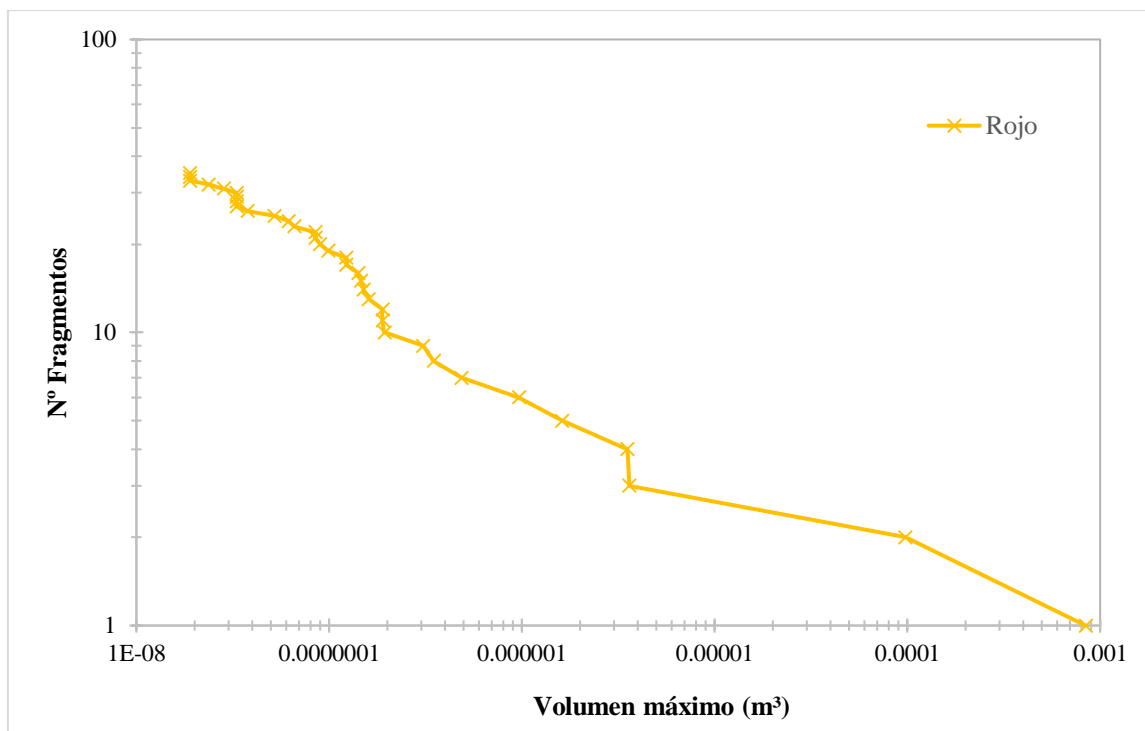
**Figura 87.** Ensayo de conminución nº 34



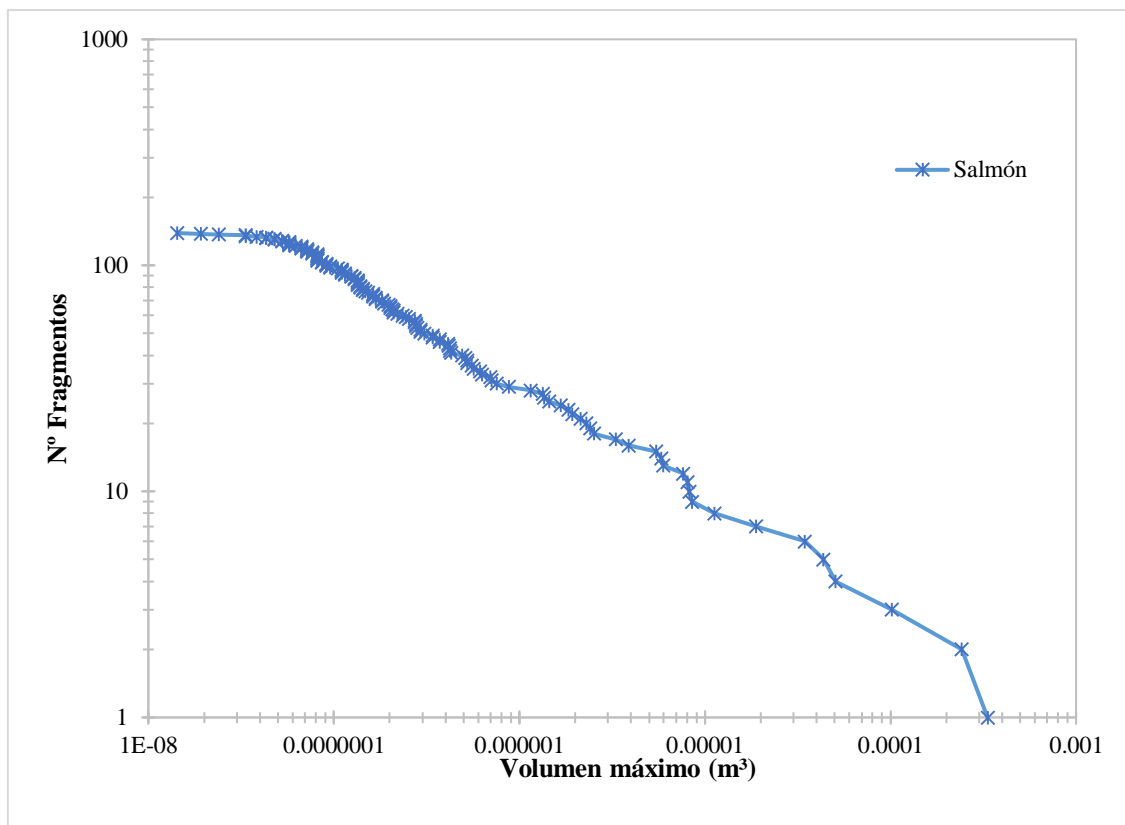
**Figura 88.** Ensayo de conminución nº 37



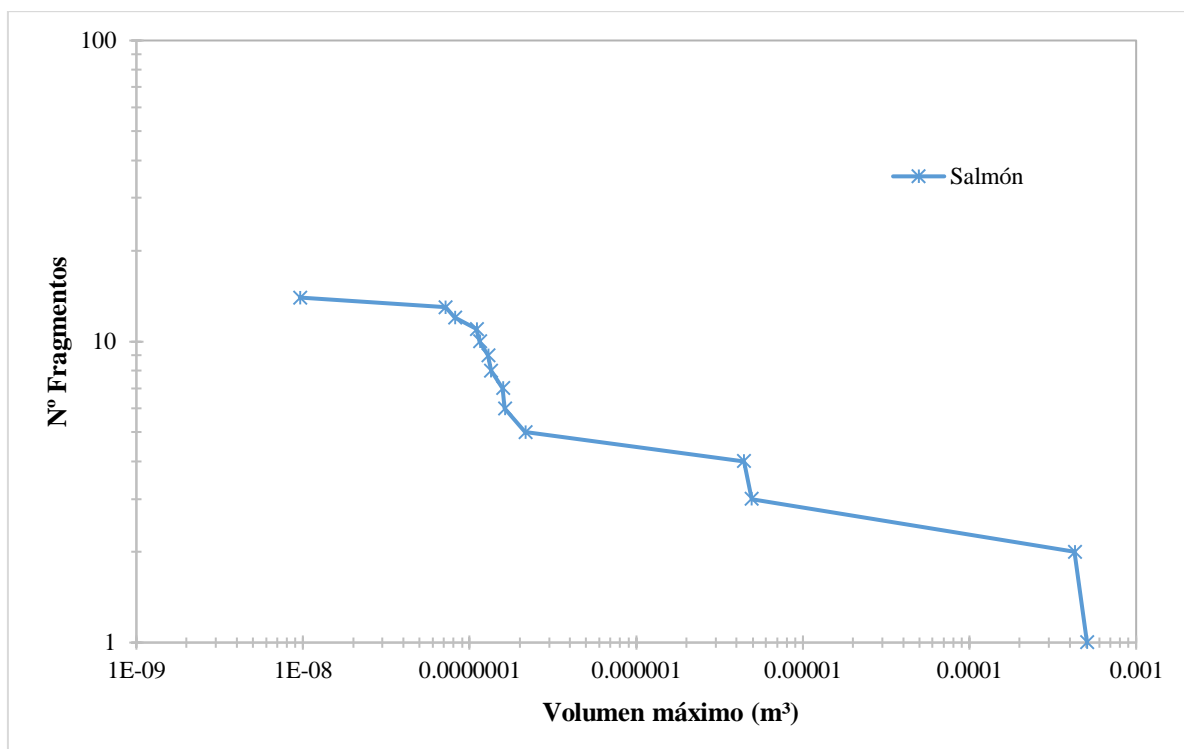
**Figura 89.** Ensayo de conminución nº 40



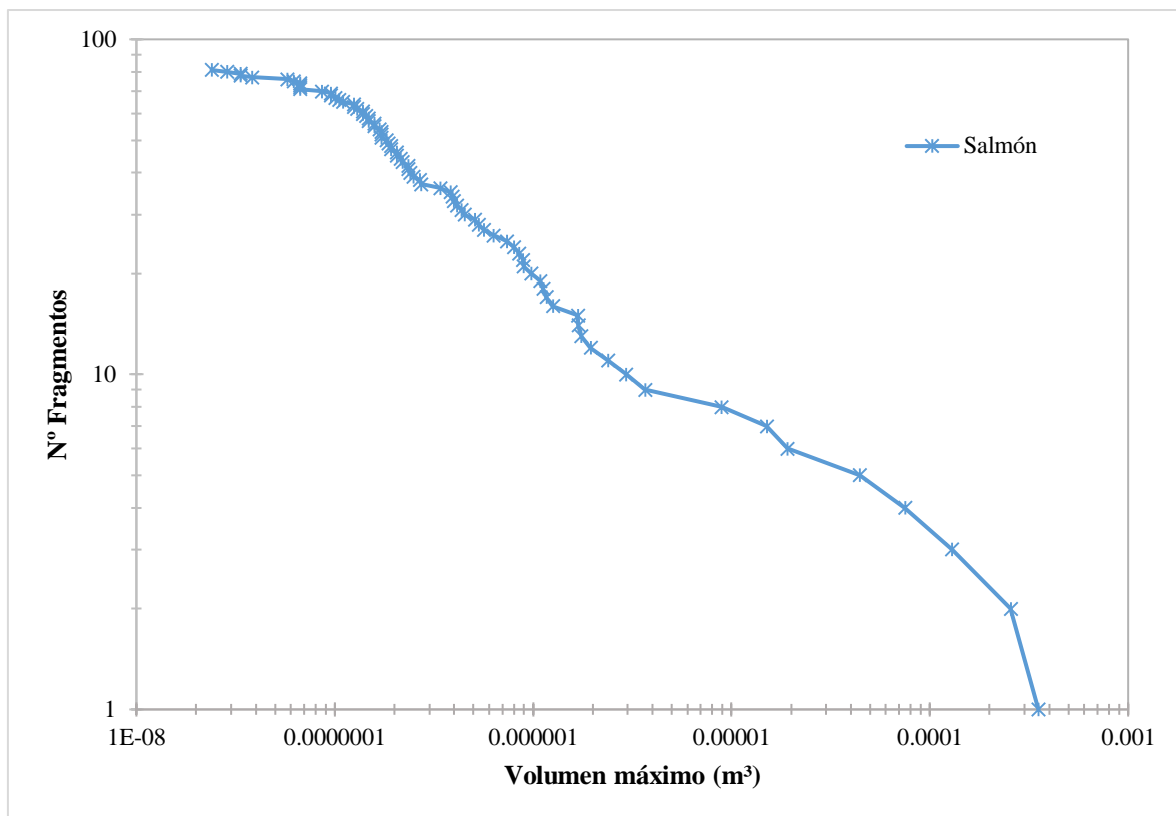
**Figura 90.** Ensayo de conminución nº 43



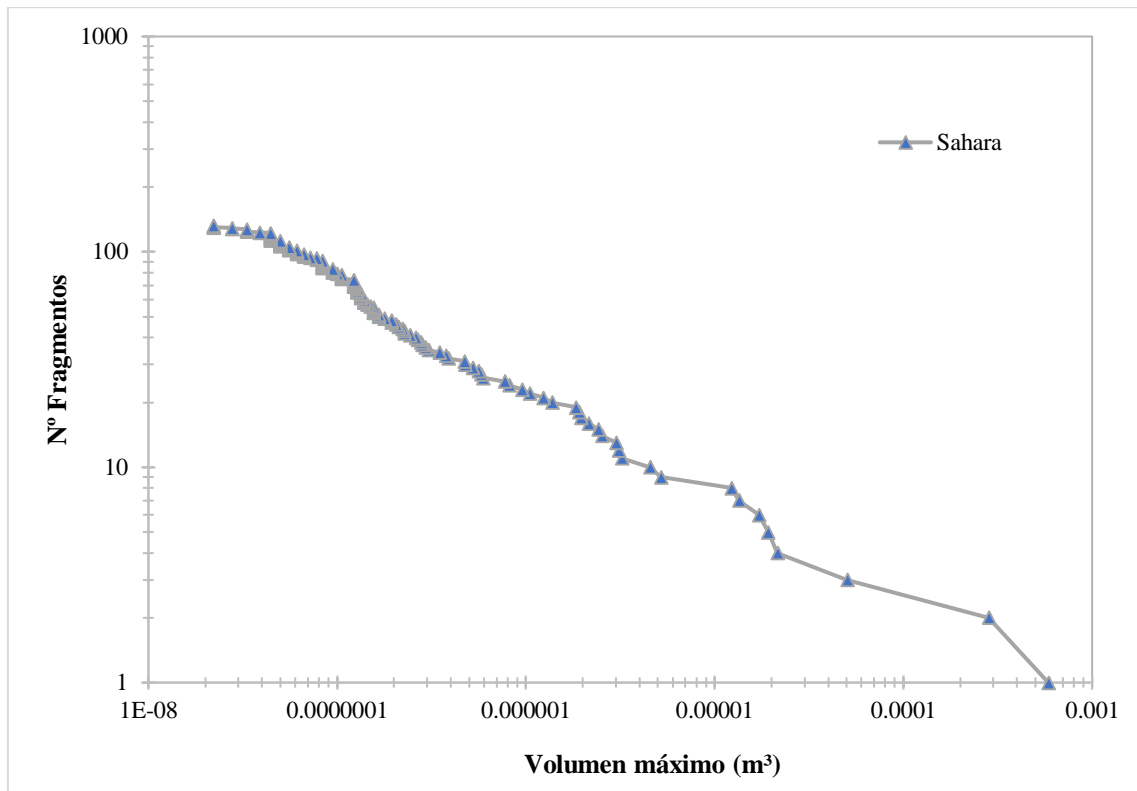
**Figura 91.** Ensayo de conminución n° 46



**Figura 92.** Ensayo de conminución n° 49

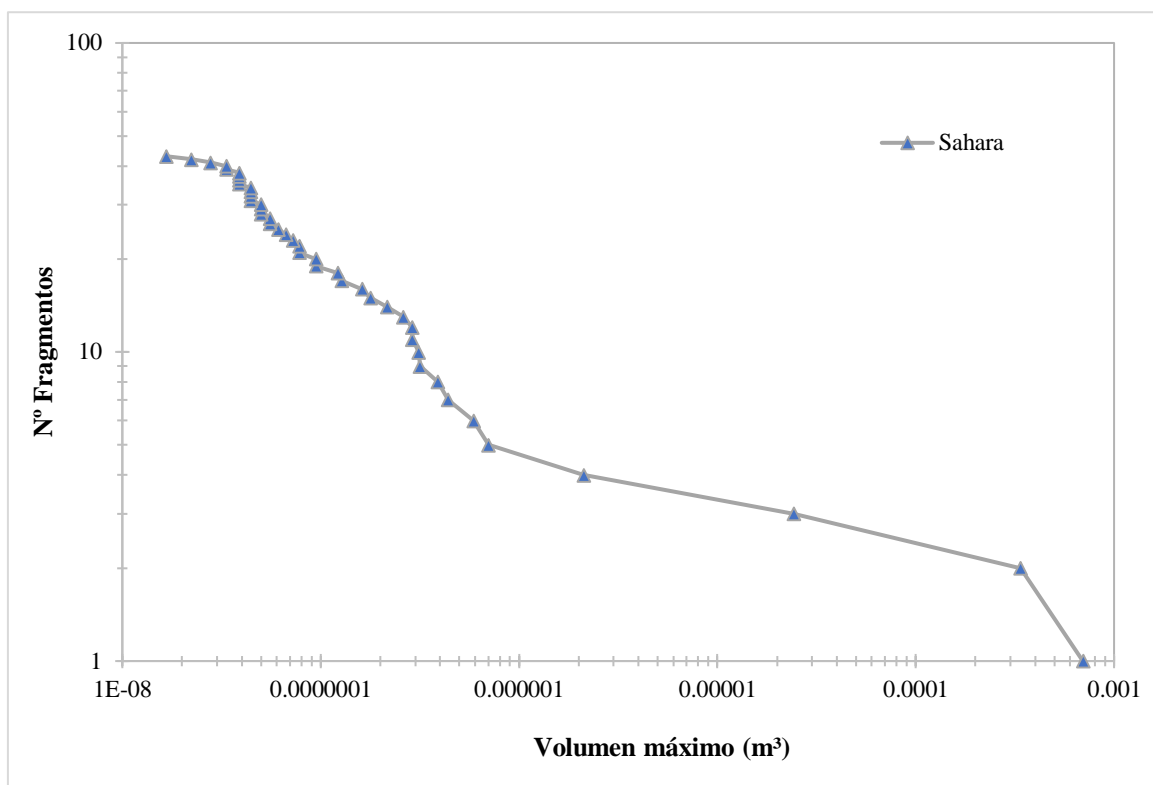


**Figura 93.** Ensayo de conminución n° 52

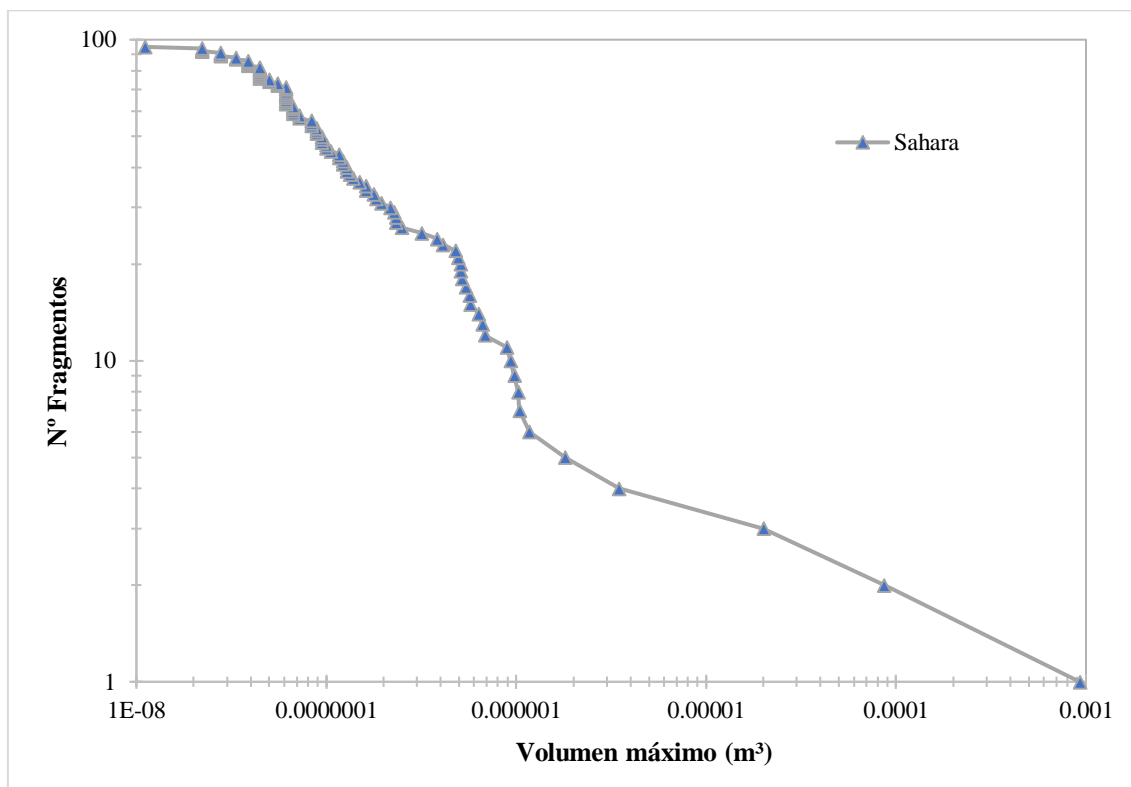


**Figura 94.** Ensayo de conminución n° 55

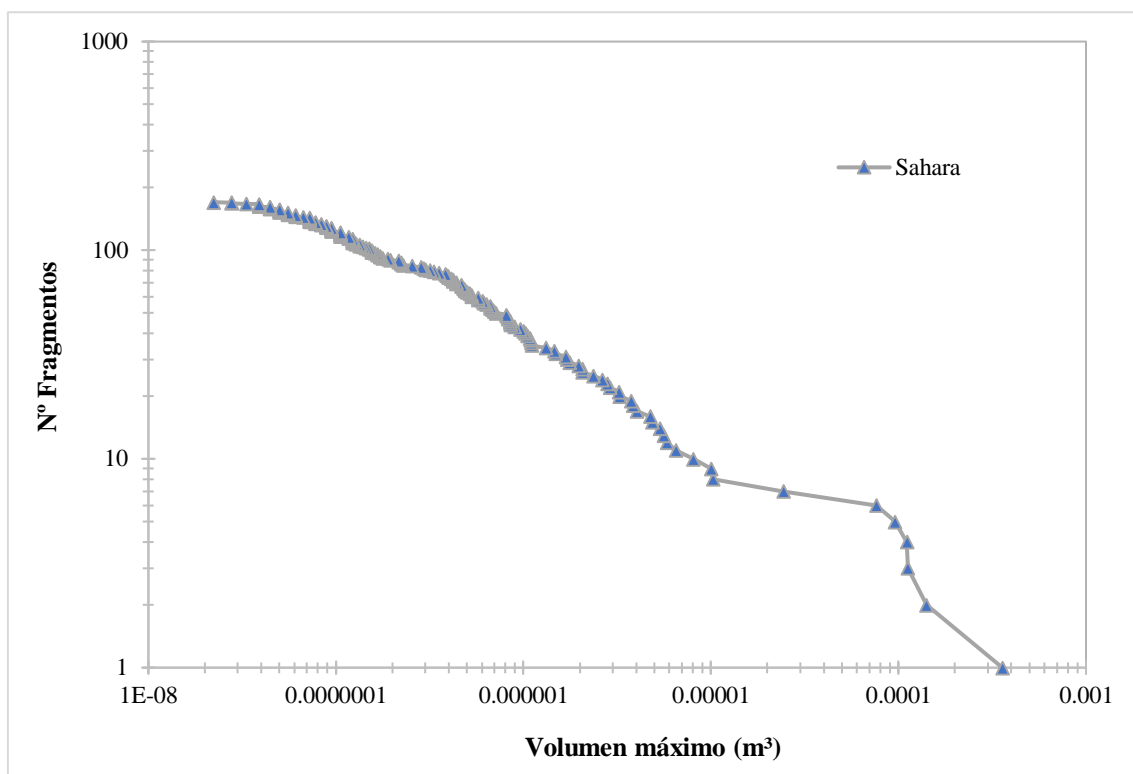




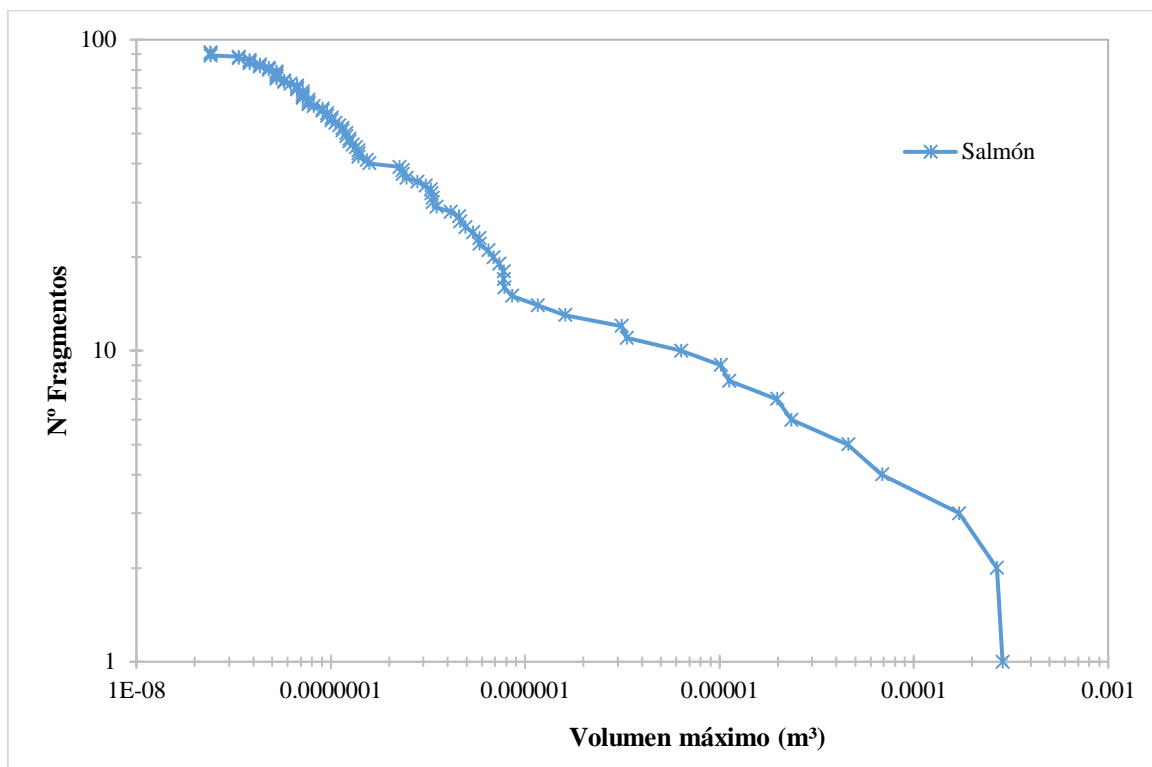
**Figura 95.** Ensayo de conminución nº 58



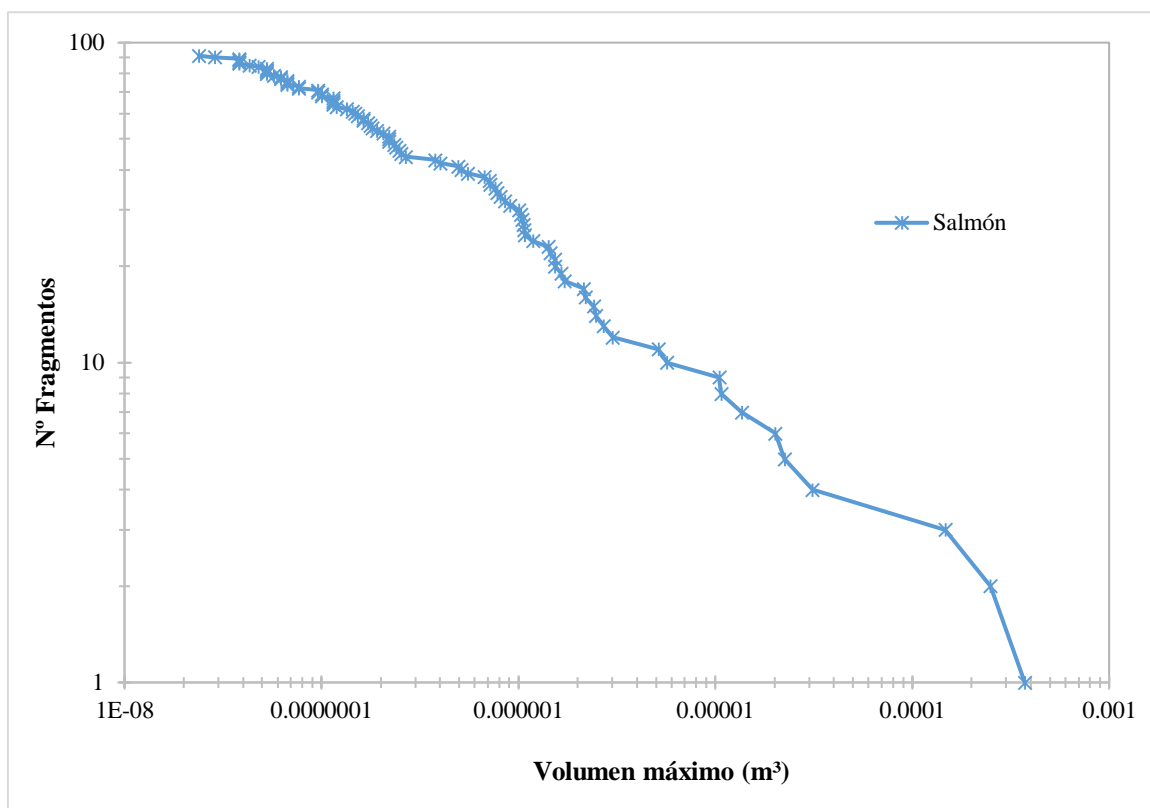
**Figura 96.** Ensayo de conminución nº 61



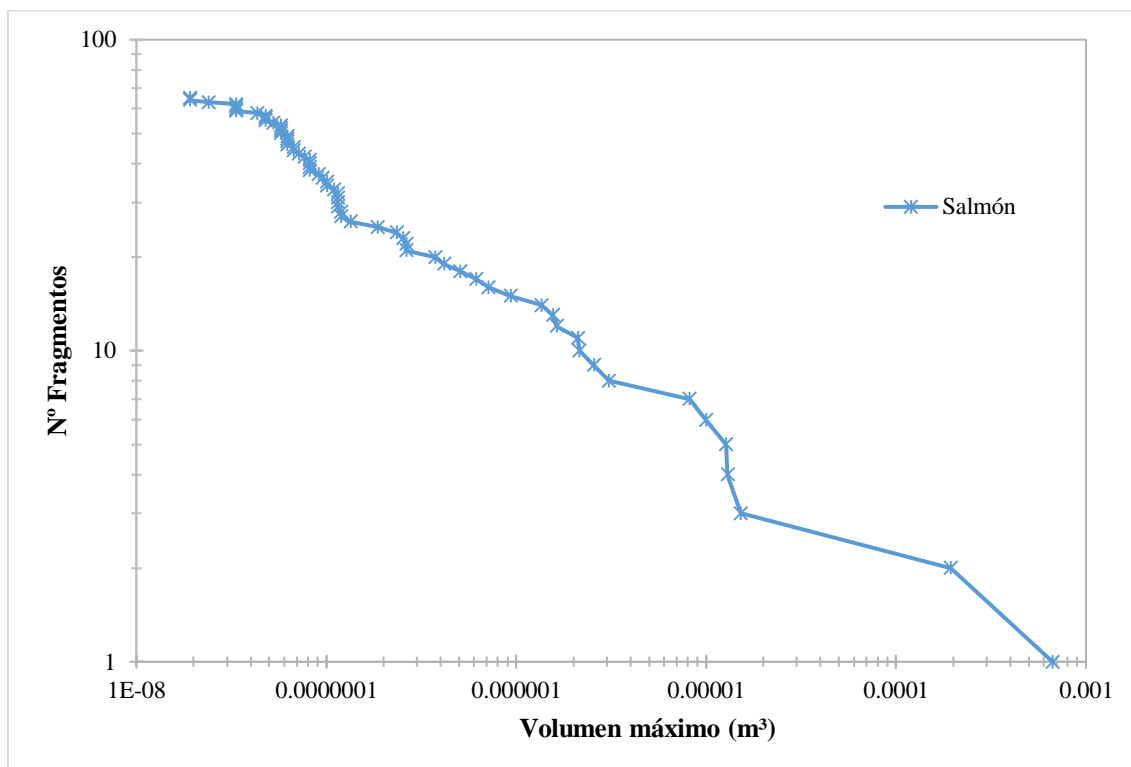
**Figura 97.** Ensayo de conminución nº 64



**Figura 98.** Ensayo de conminución nº 67

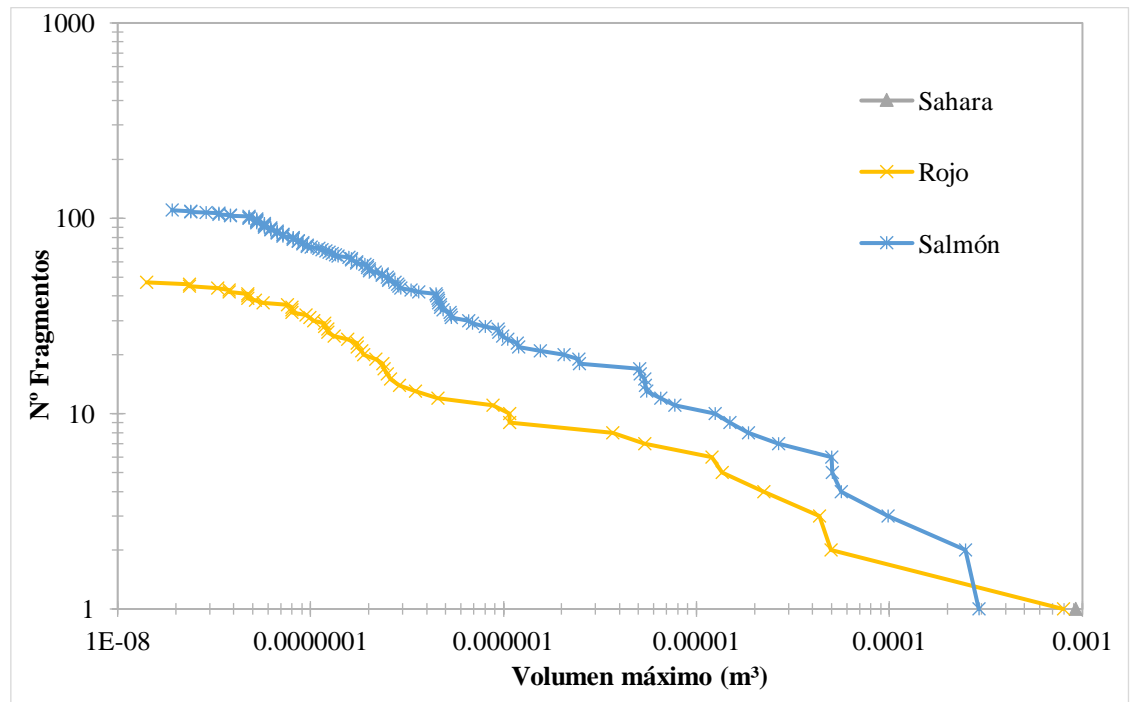


**Figura 99.** Ensayo de conminución nº 70

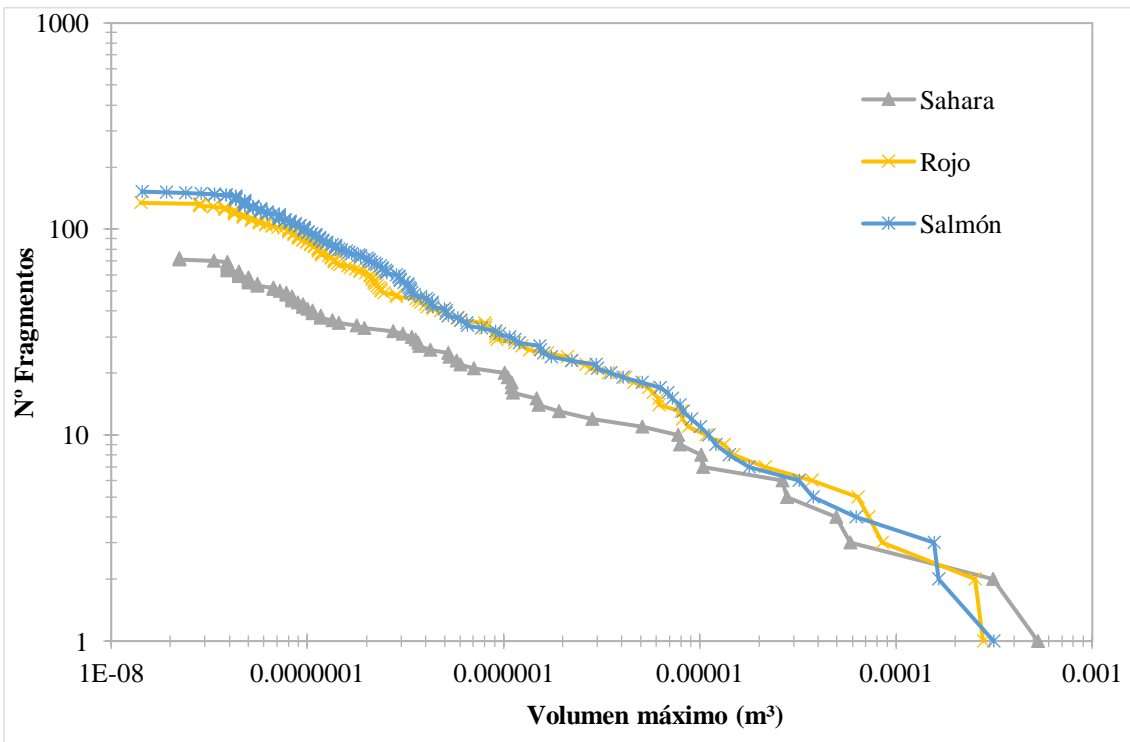


**Figura 100.** Ensayo de conminución nº 73

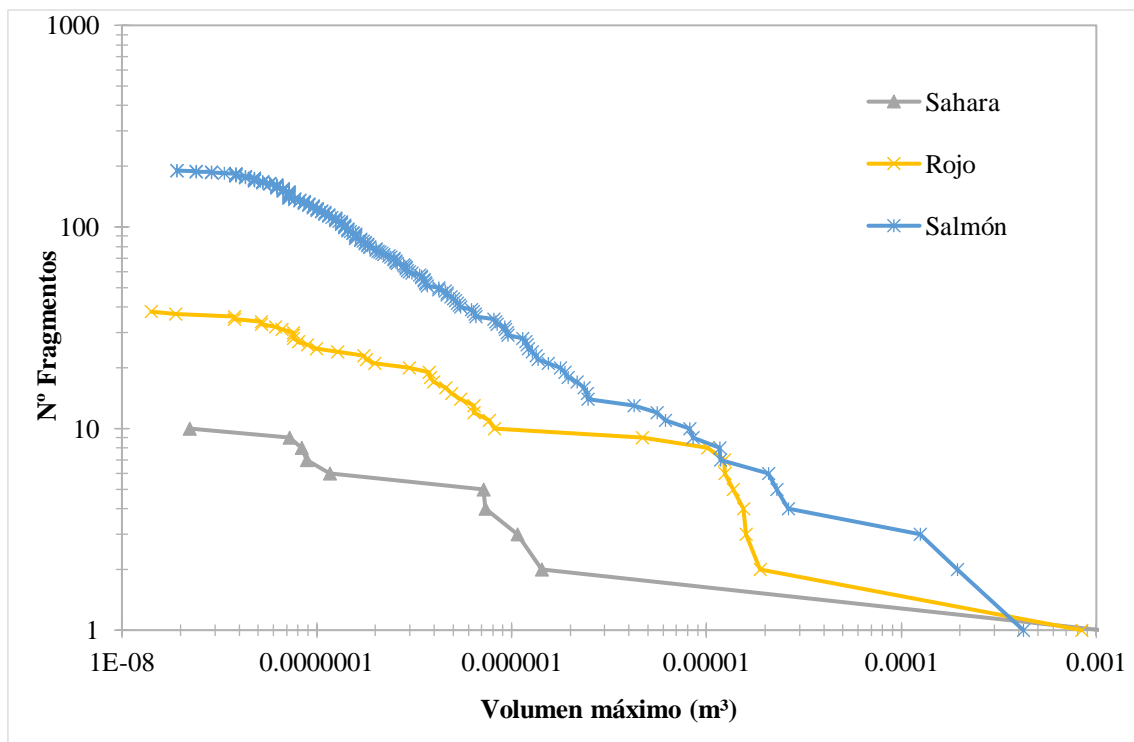
**A5.2 Ensayos de 3 adoquines.**



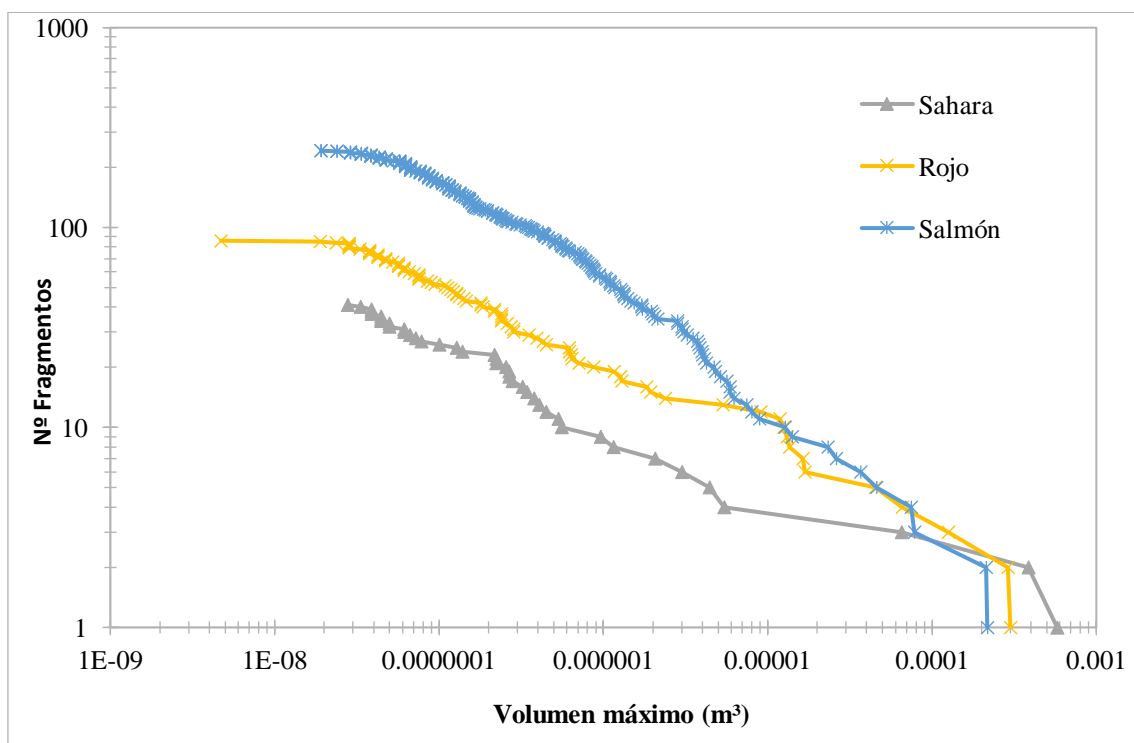
**Figura 101.** Ensayo de conminución nº 14



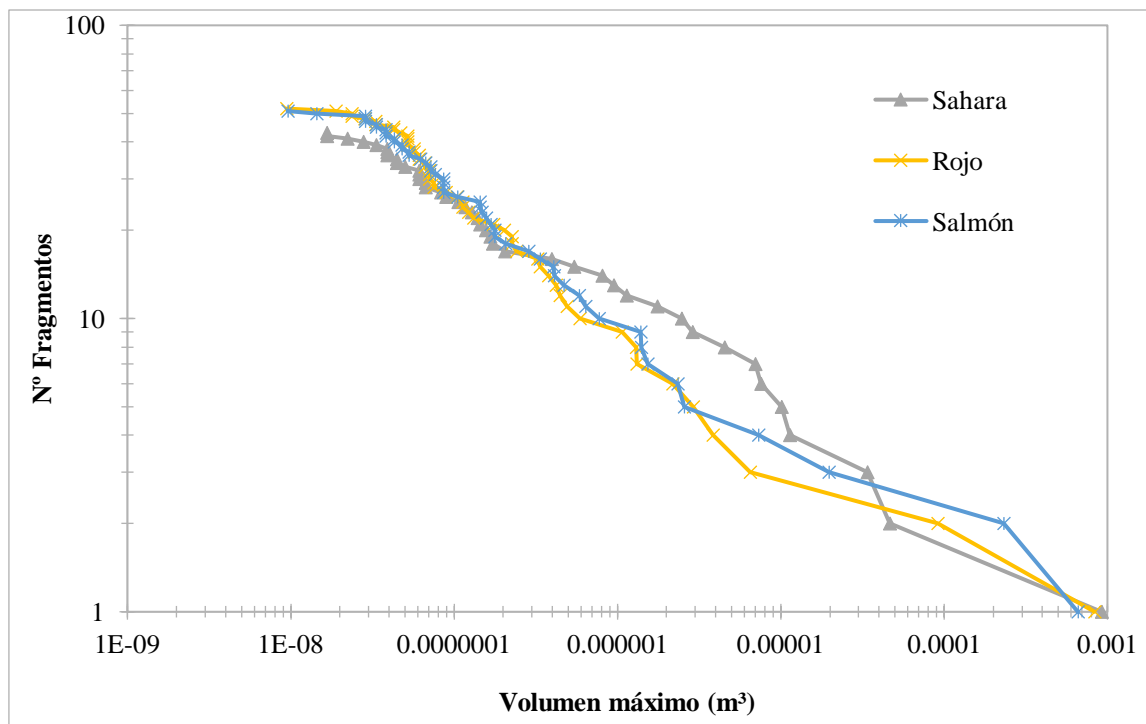
**Figura 102.** Ensayo de conminución nº 17



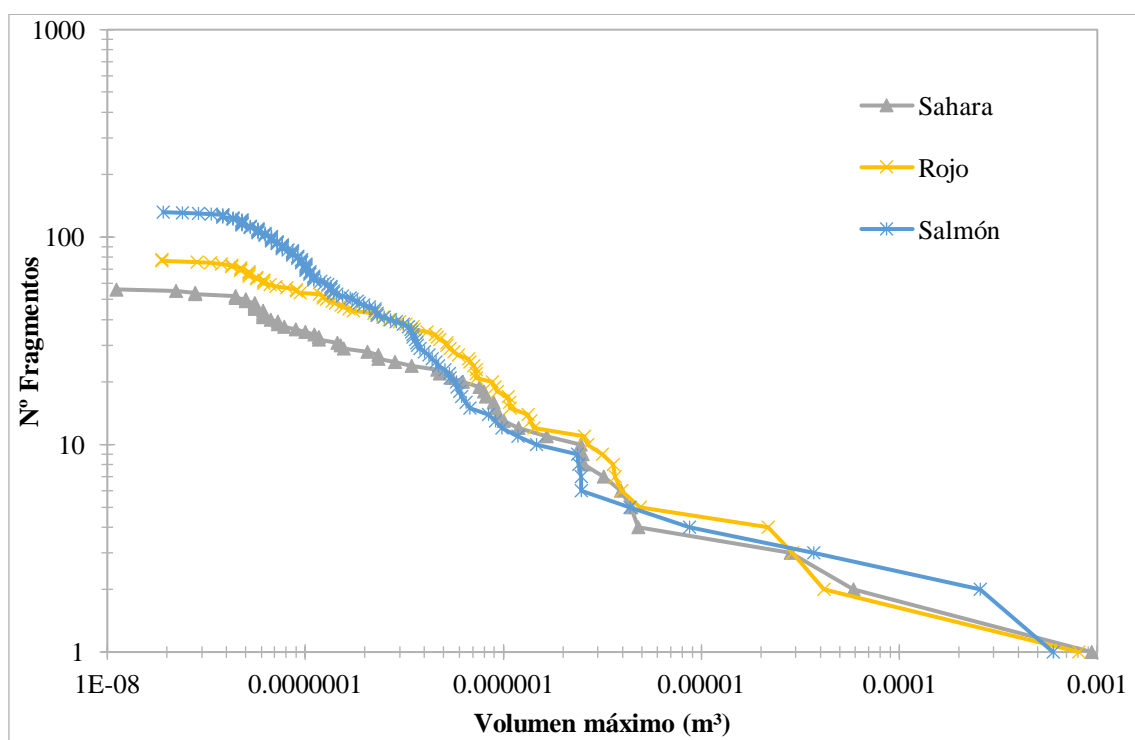
**Figura 103.** Ensayo de conminución nº 23



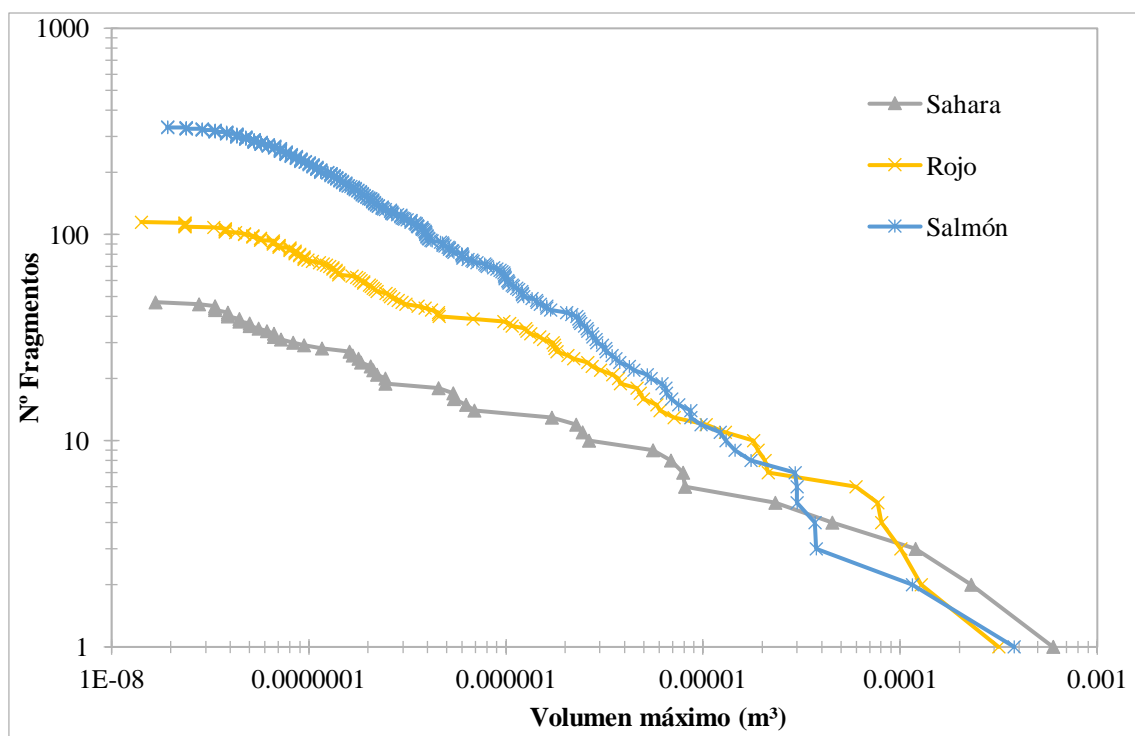
**Figura 104.** Ensayo de conminución nº 26



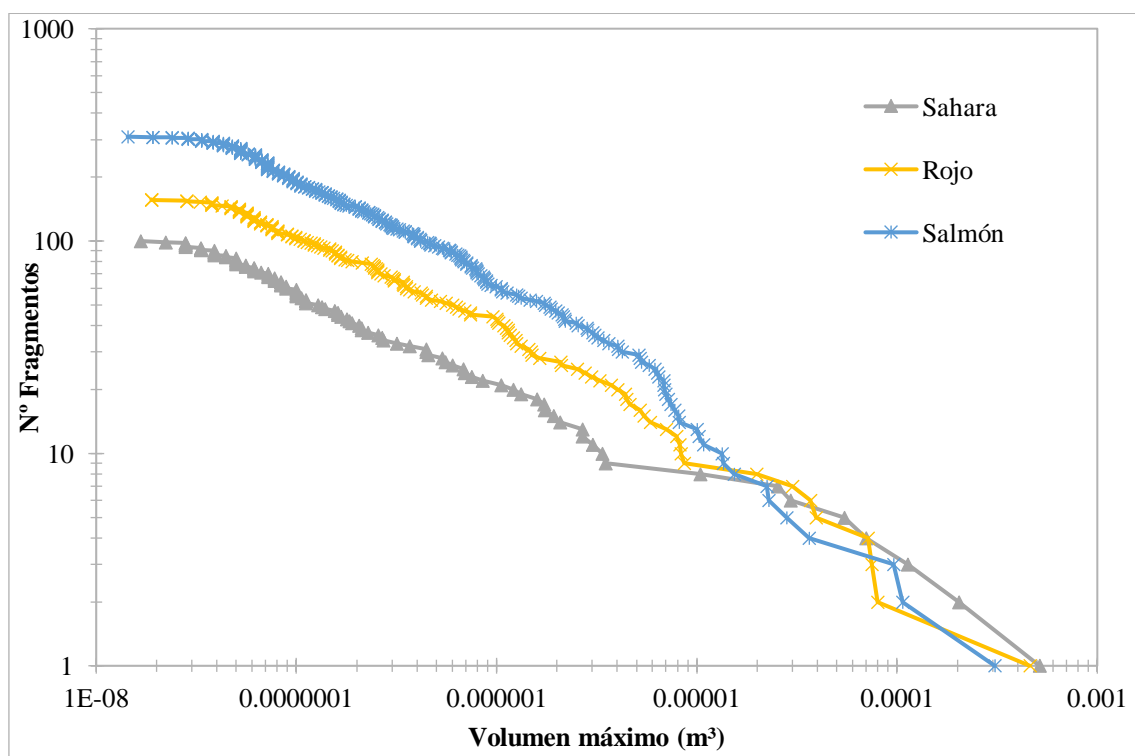
**Figura 105.** Ensayo de conminución nº 29



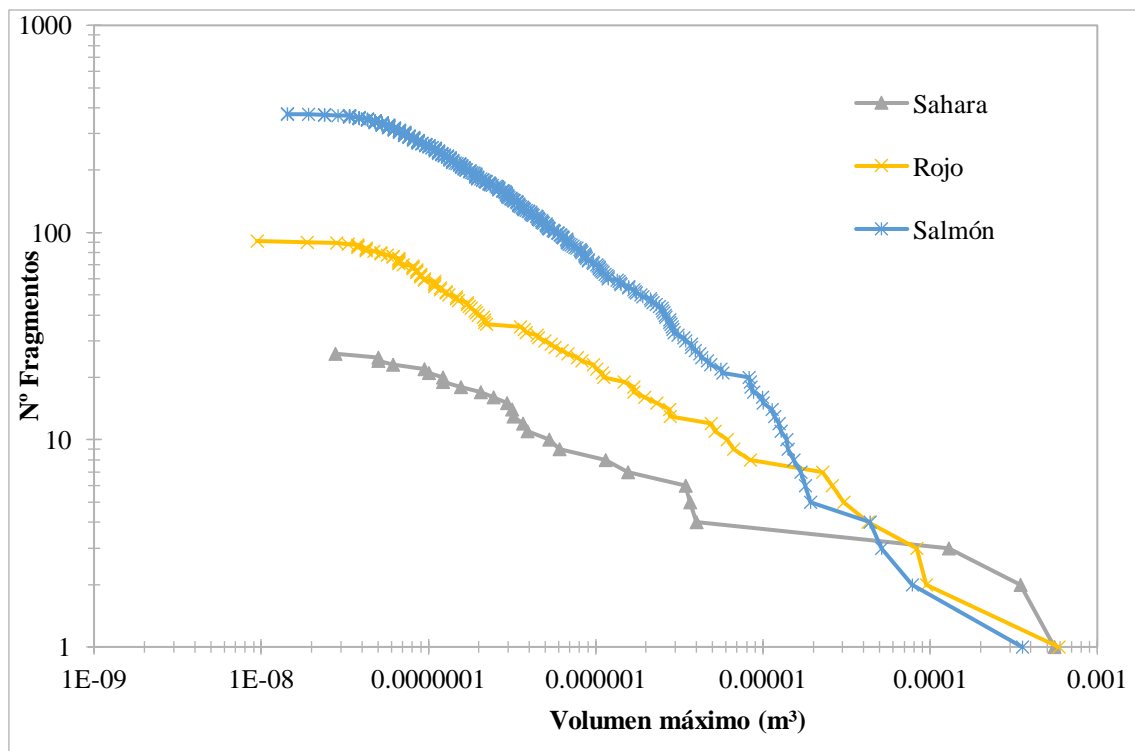
**Figura 106.** Ensayo de conminución nº 32



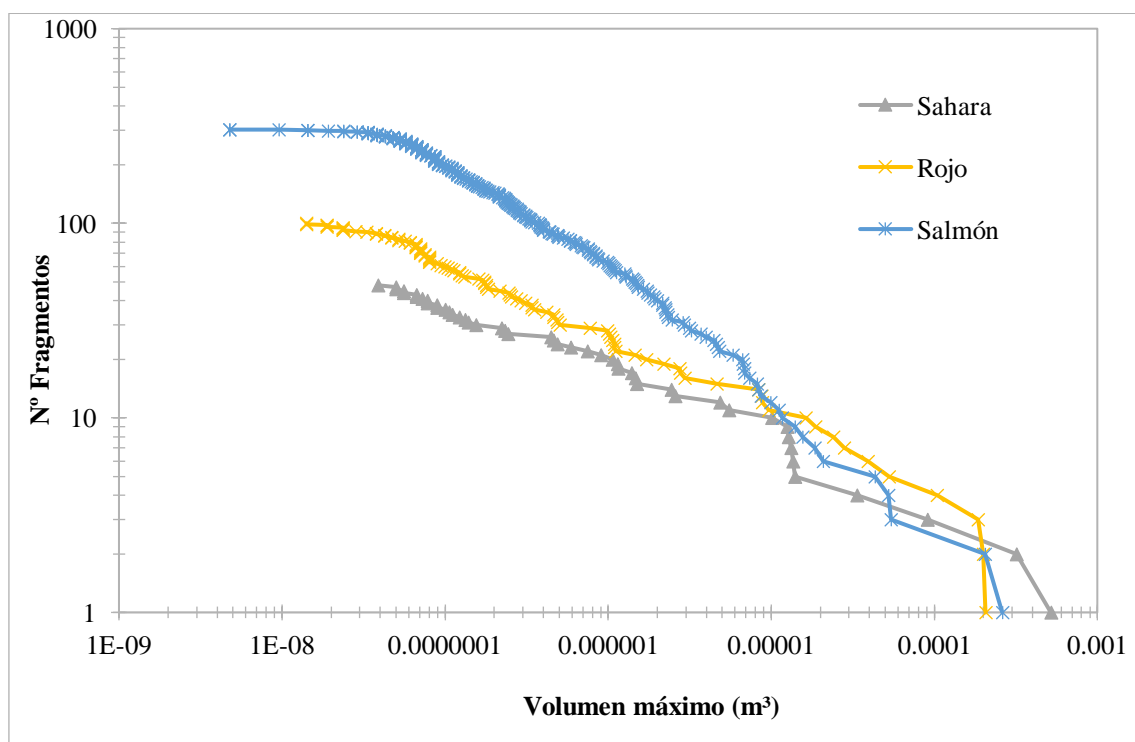
**Figura 107.** Ensayo de conminución n° 44



**Figura 108.** Ensayo de conminución n° 47

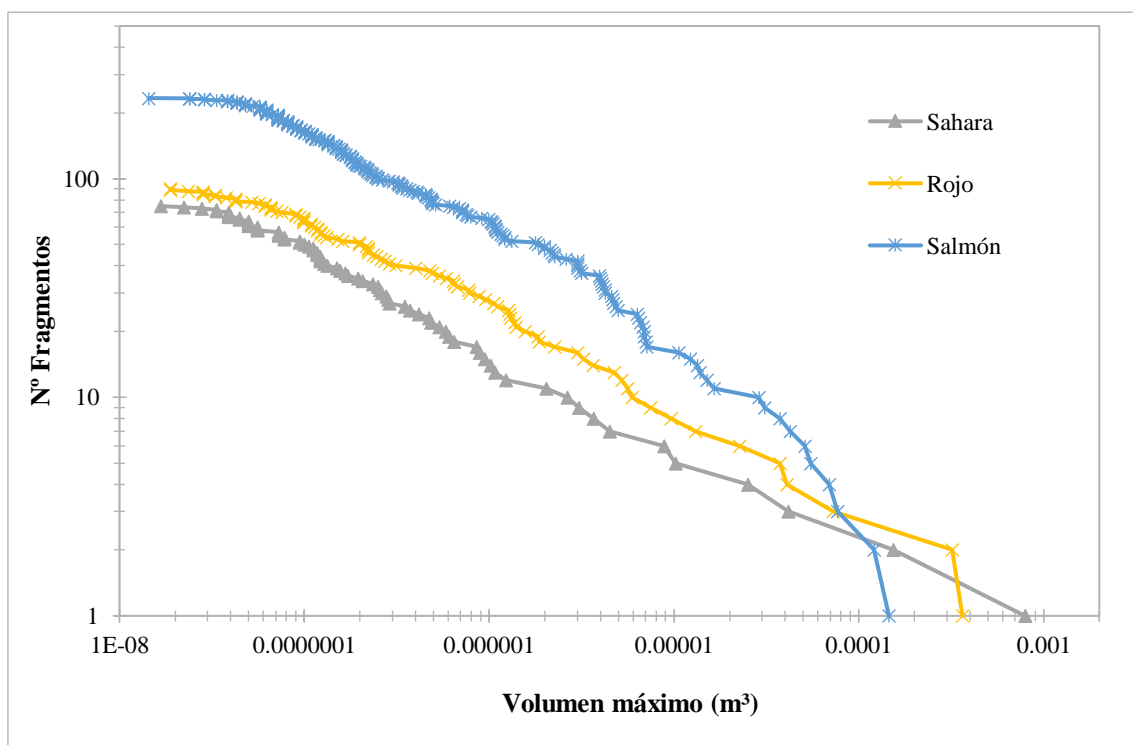


**Figura 109.** Ensayo de conminución nº 50

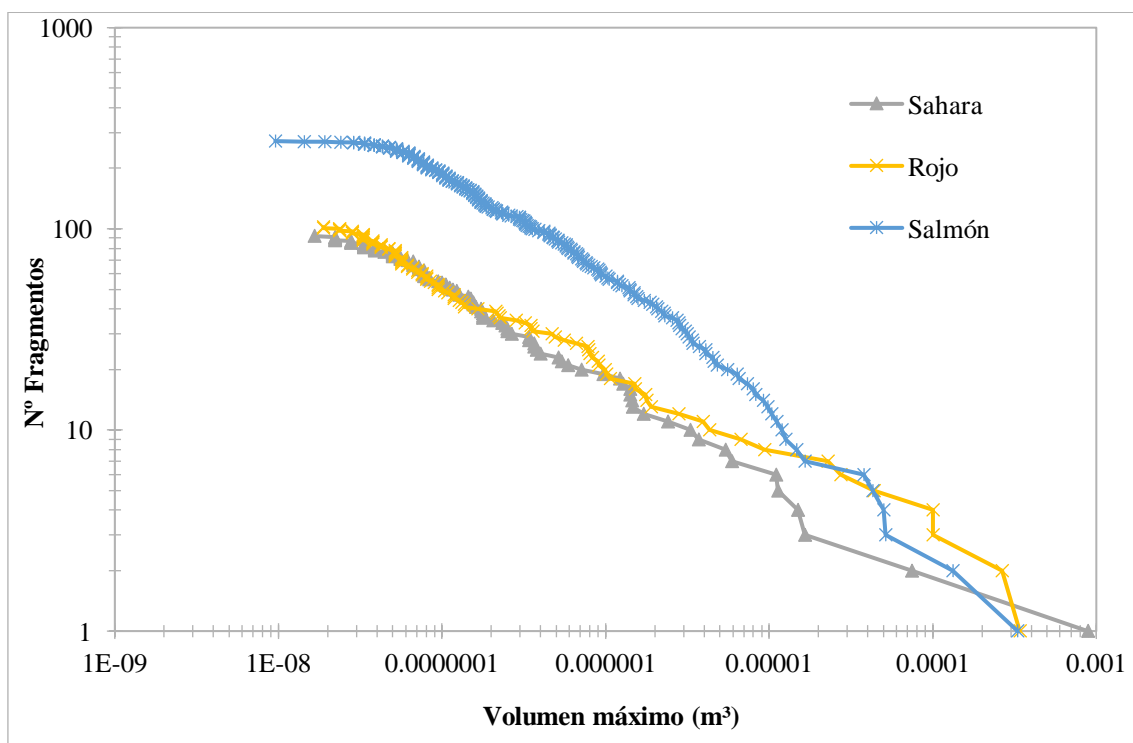


**Figura 110.** Ensayo de conminución nº 56

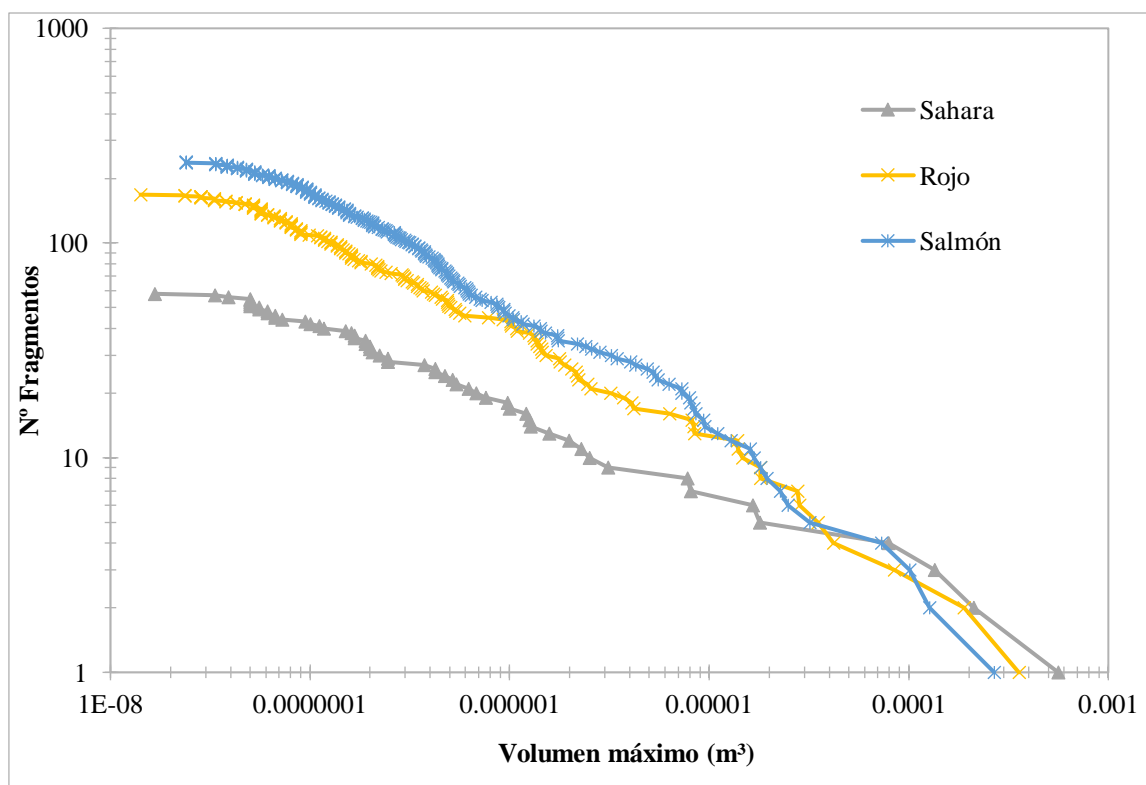




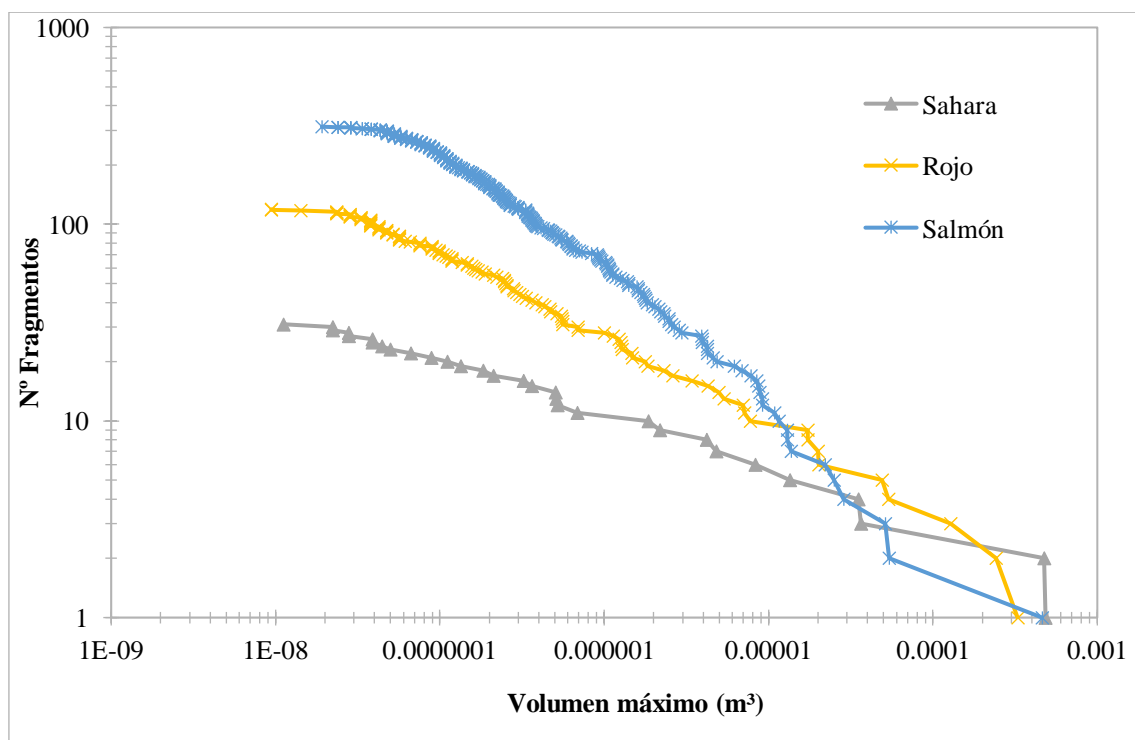
**Figura 111.** Ensayo de conminución nº 62



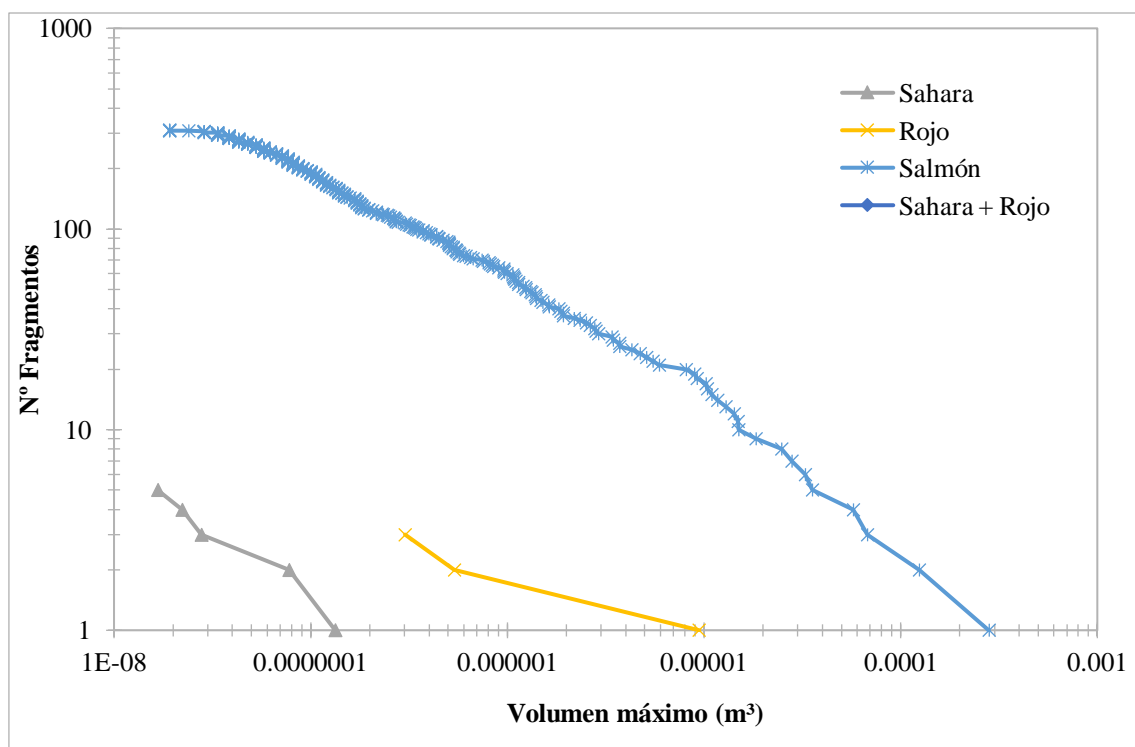
**Figura 112.** Ensayo de conminución nº 65



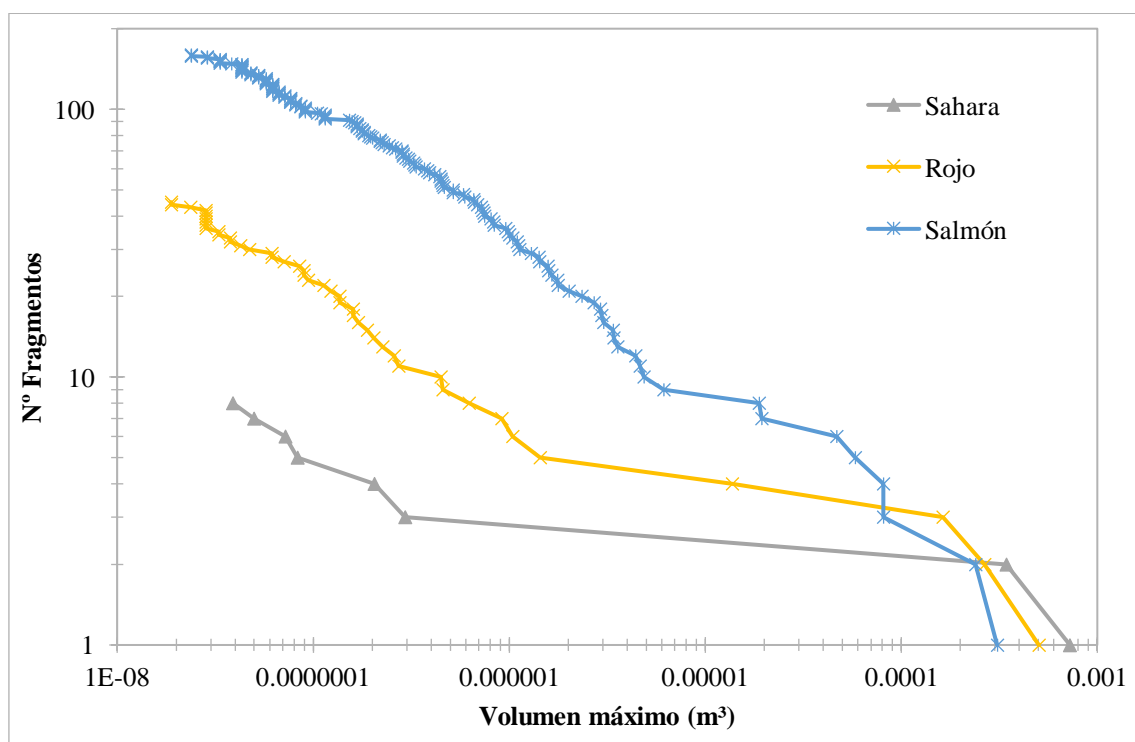
**Figura 113.** Ensayo de conminución nº 68



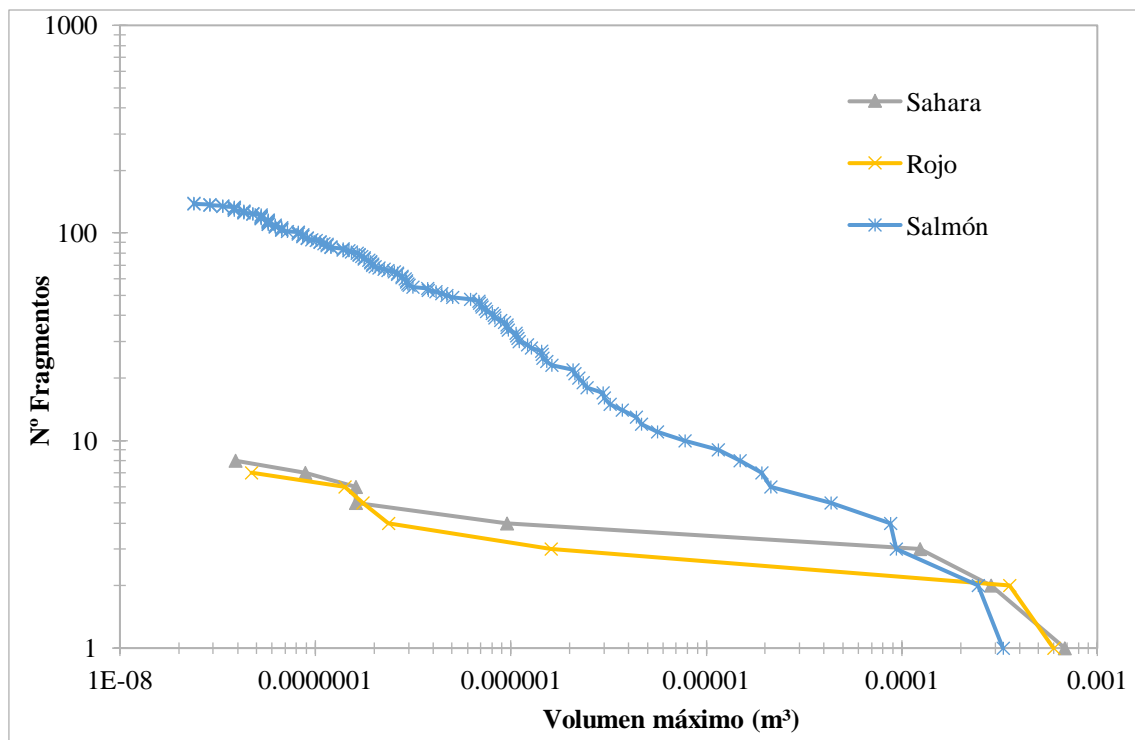
**Figura 114.** Ensayo de conminución nº 74



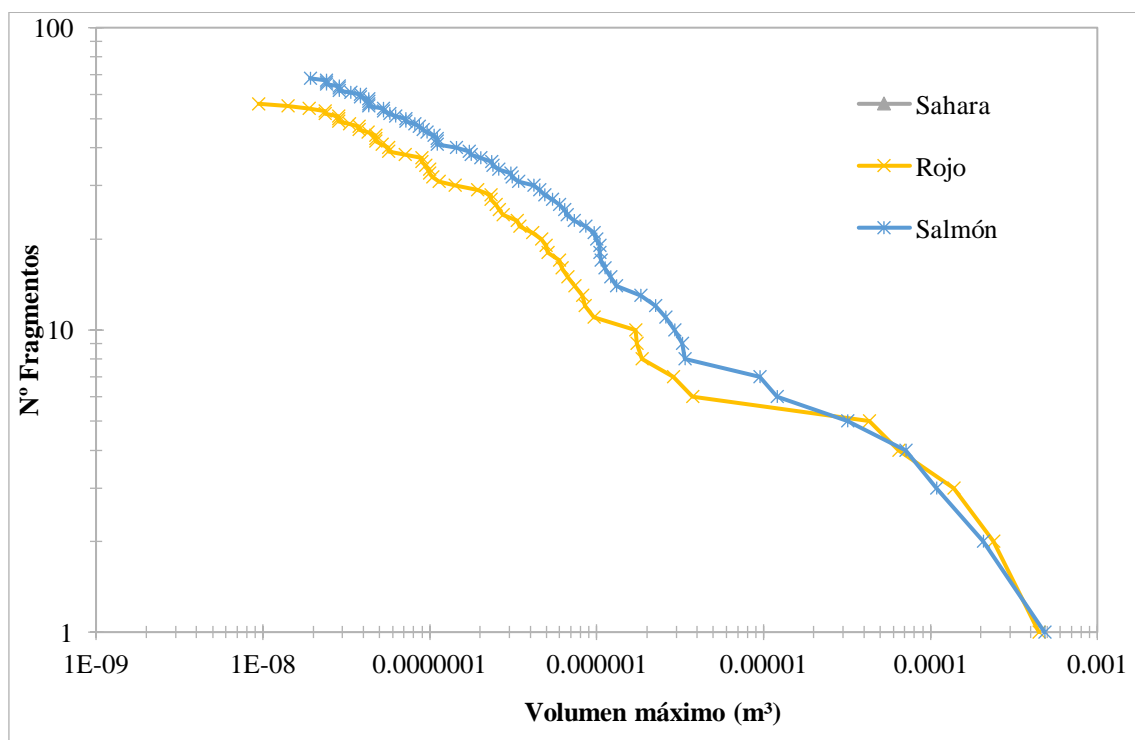
**Figura 115.** Ensayo de conminución n° 77



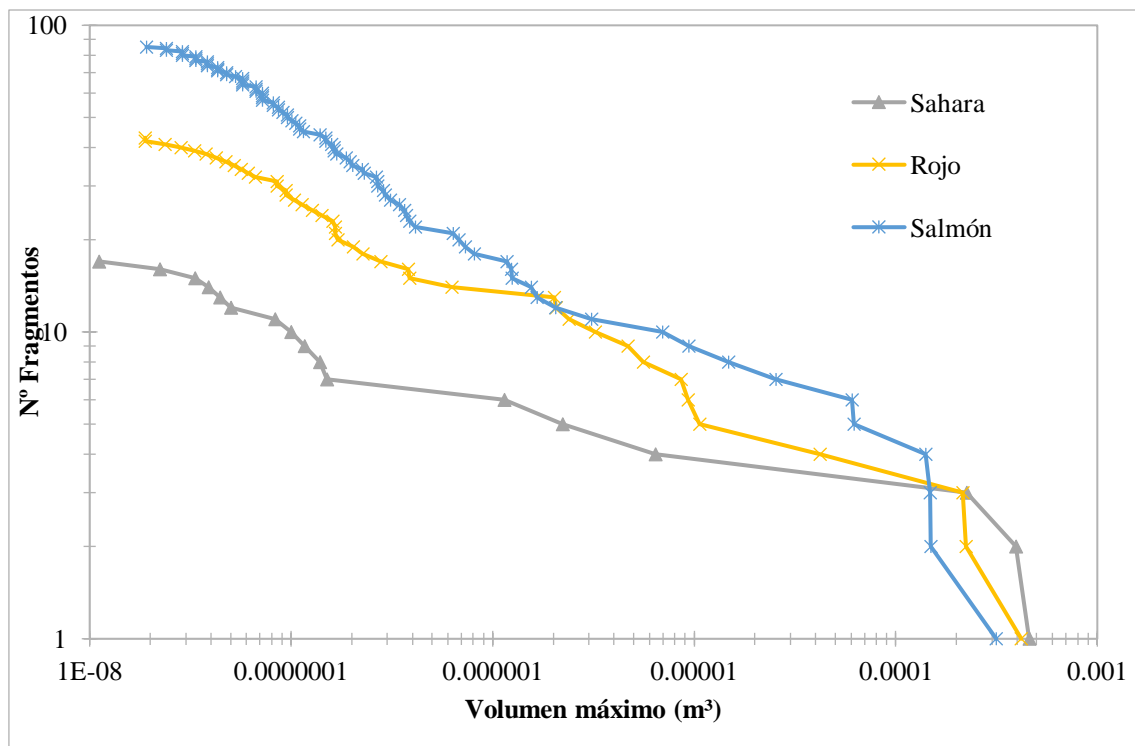
**Figura 116.** Ensayo de conminución n° 79



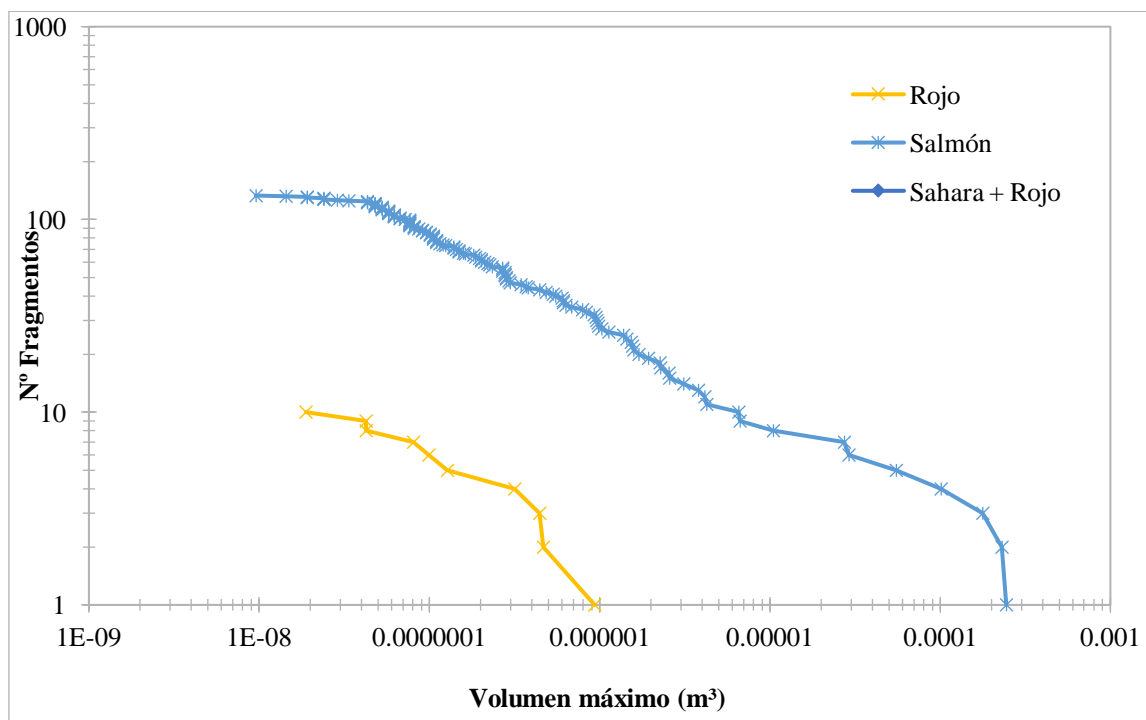
**Figura 117.** Ensayo de conminución nº 81



**Figura 118.** Ensayo de conminución nº 83



**Figura 119.** Ensayo de conminución nº 85



**Figura 120.** Ensayo de conminución nº 87

A5.3 Ensayos de 5 adoquines.

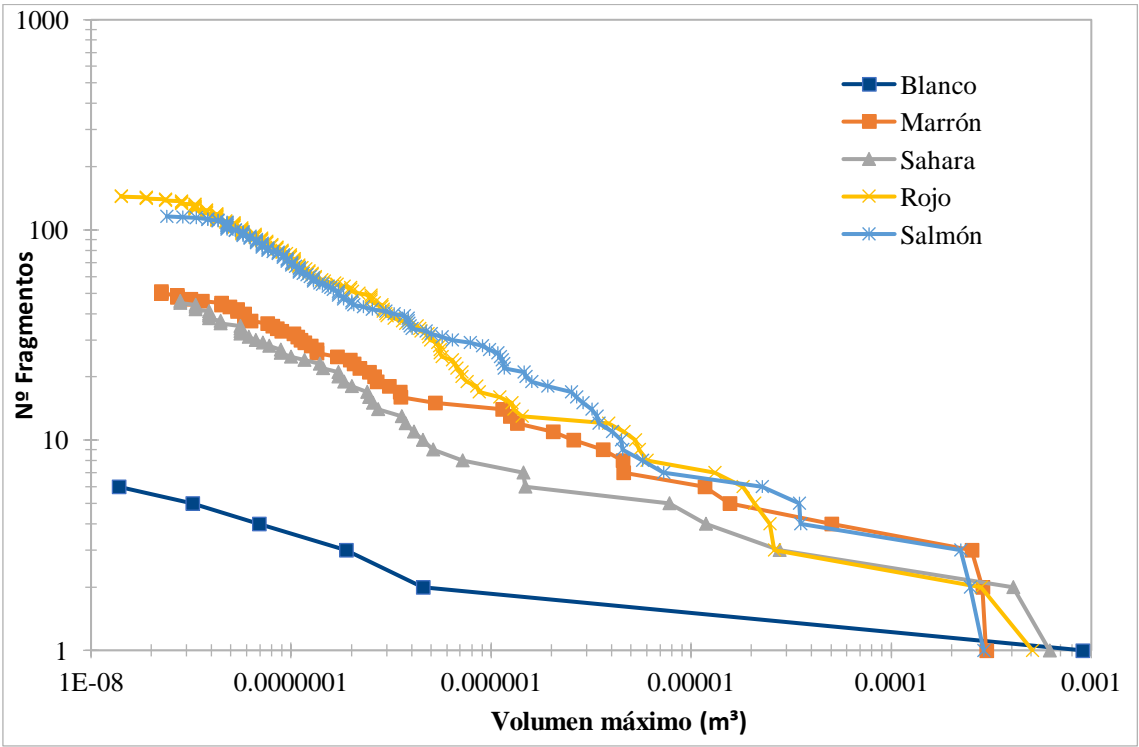


Figura 121. Ensayo de conminución nº 6

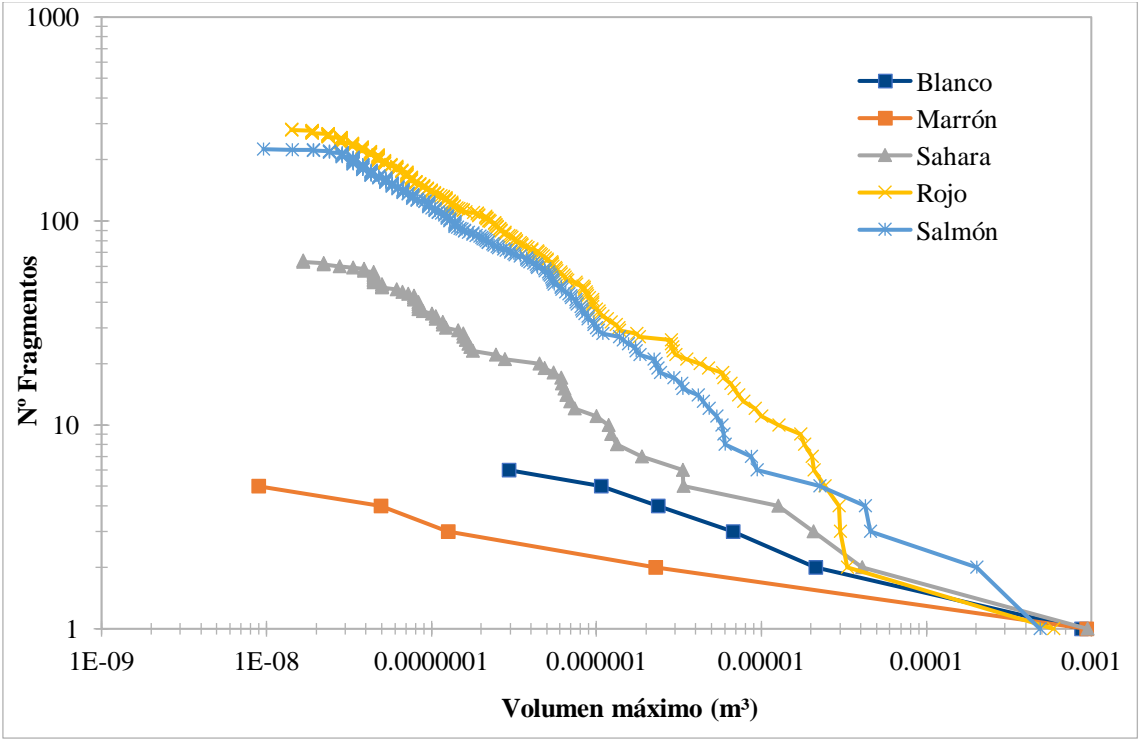
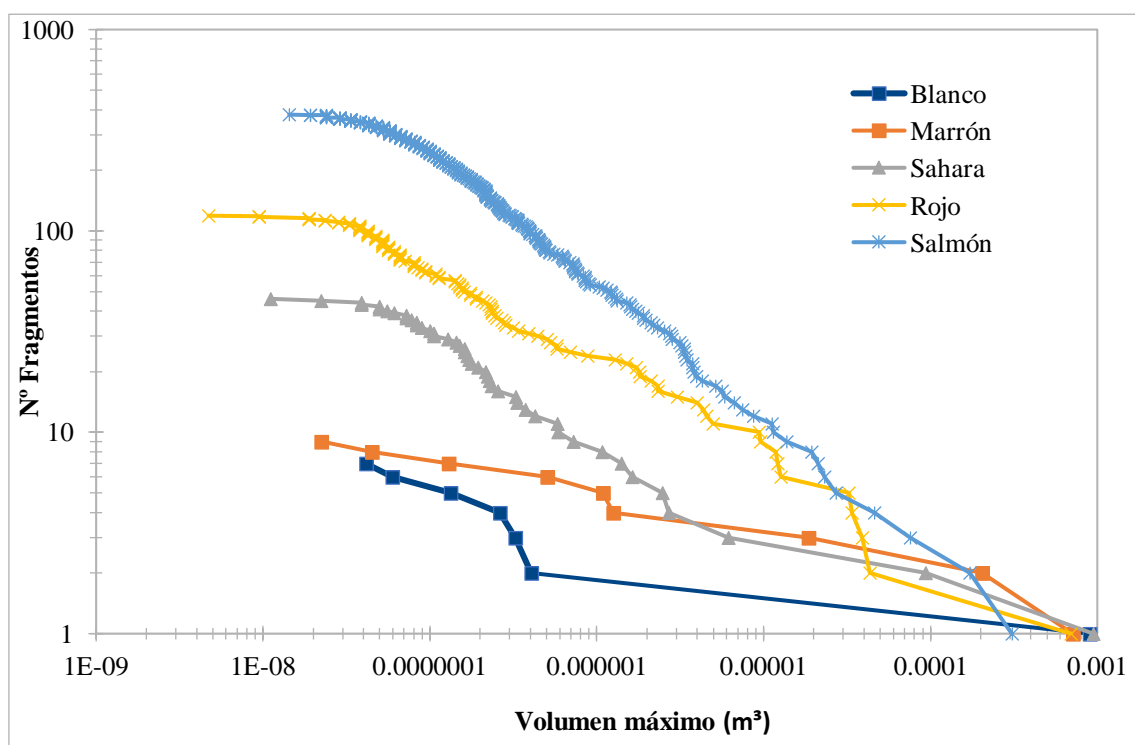
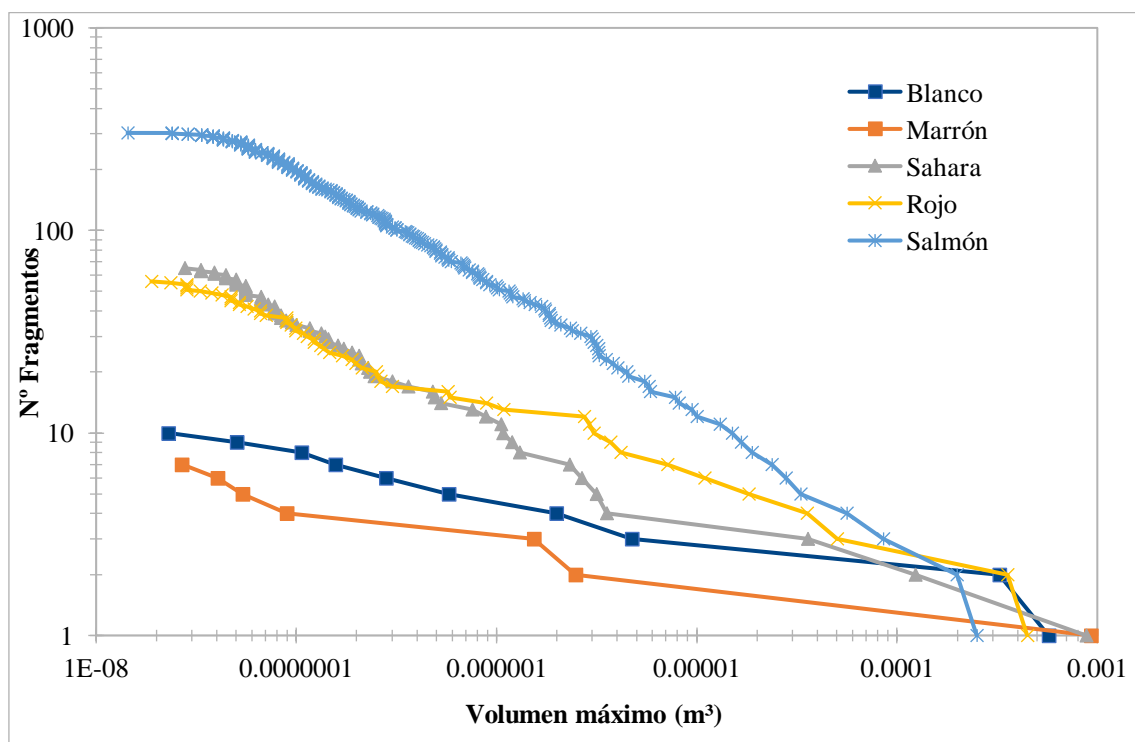


Figura 122. Ensayo de conminución nº 9

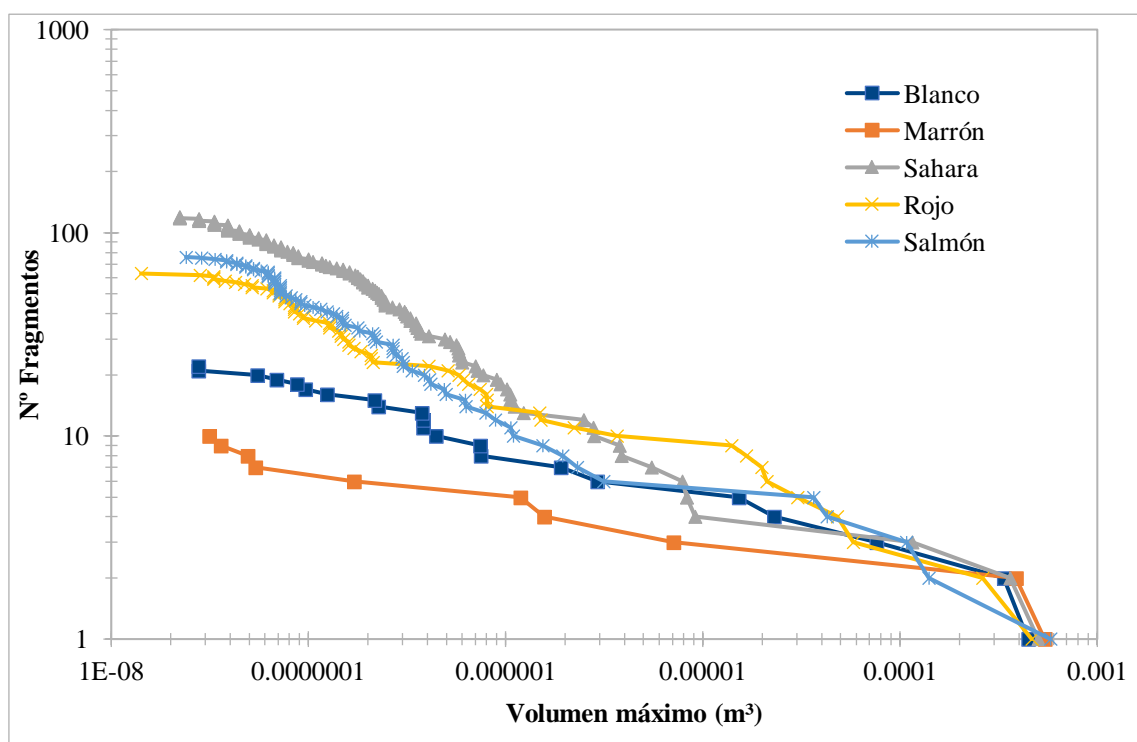




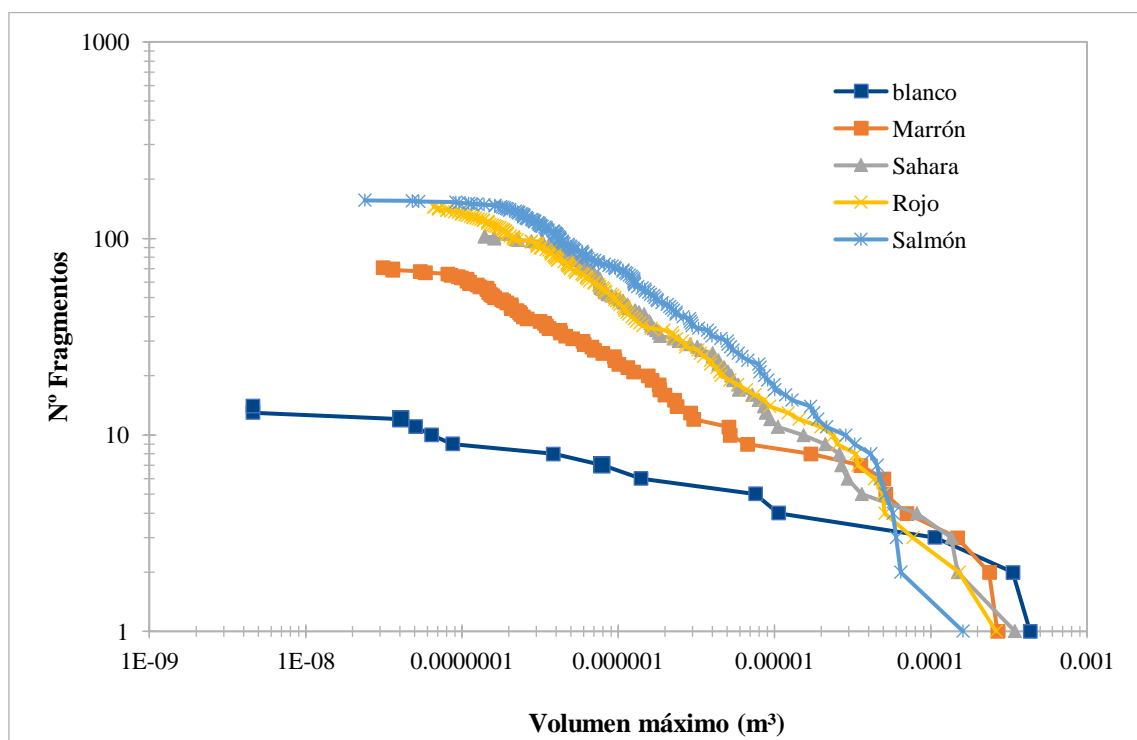
**Figura 123.** Ensayo de conminución nº 15



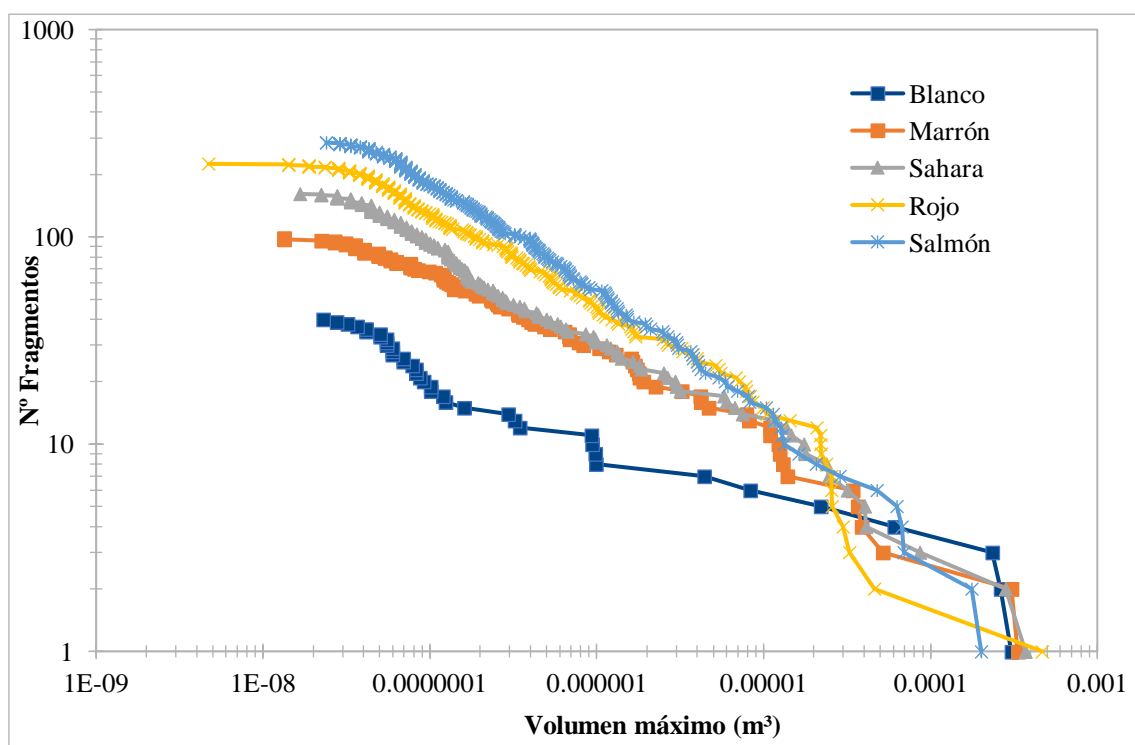
**Figura 124.** Ensayo de conminución nº 24



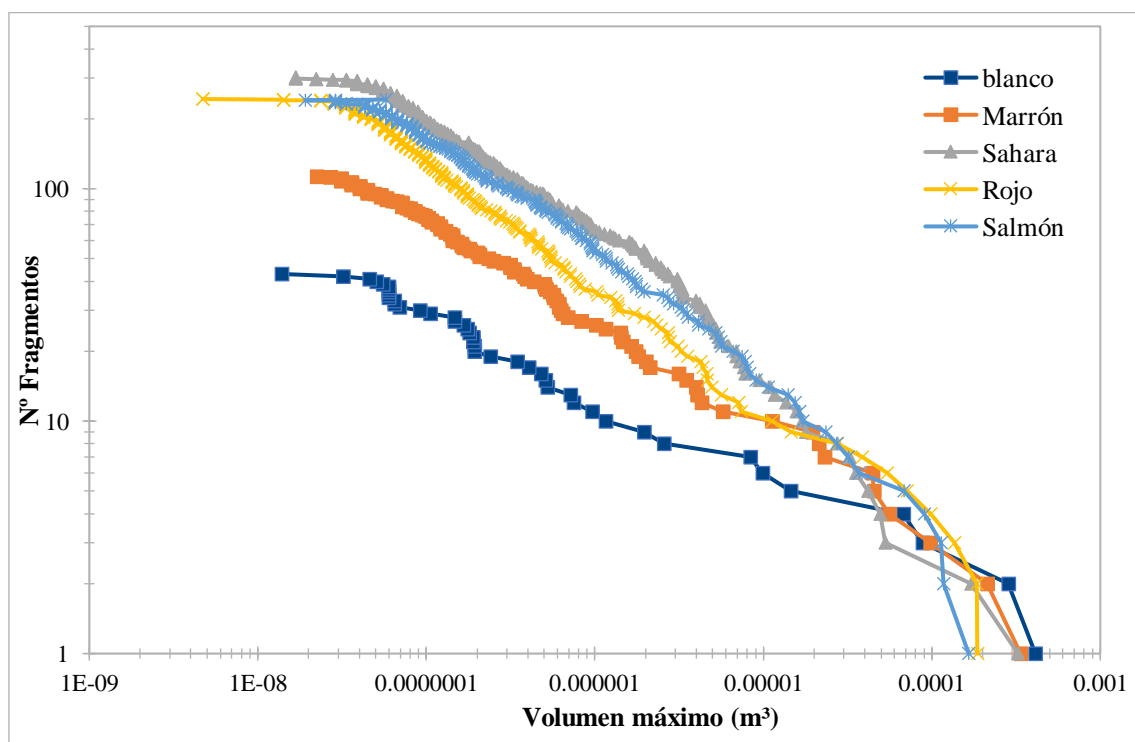
**Figura 125.** Ensayo de conminución nº 27



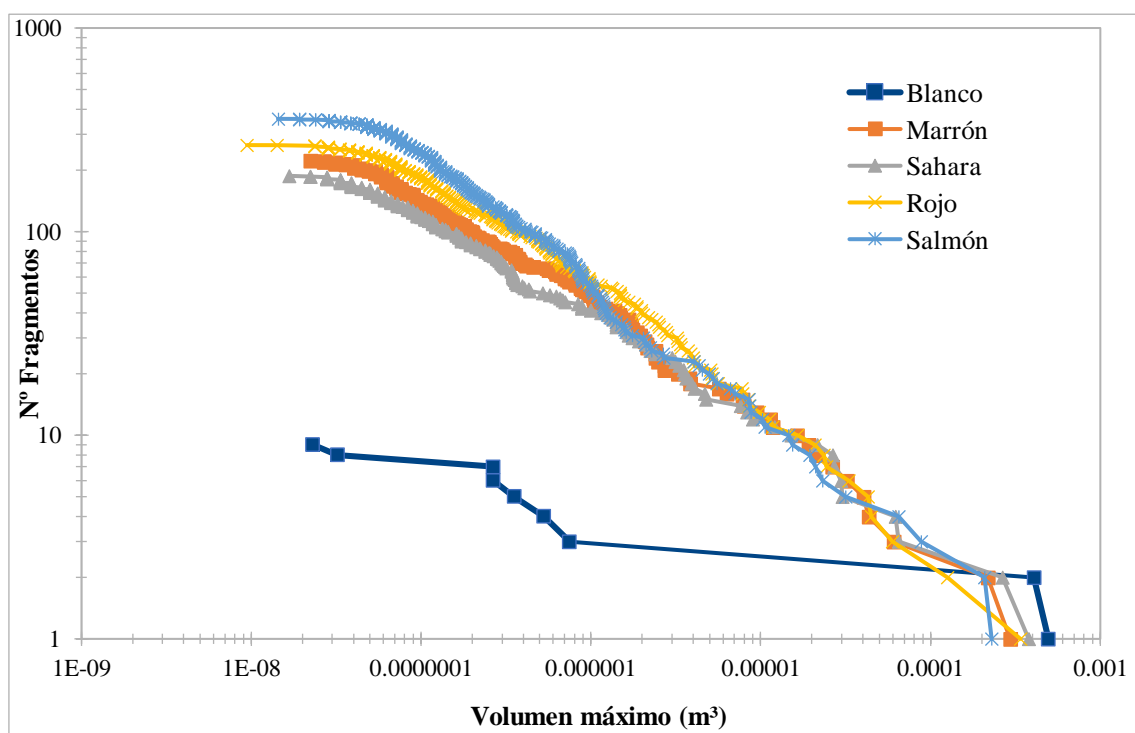
**Figura 126.** Ensayo de conminución nº 33



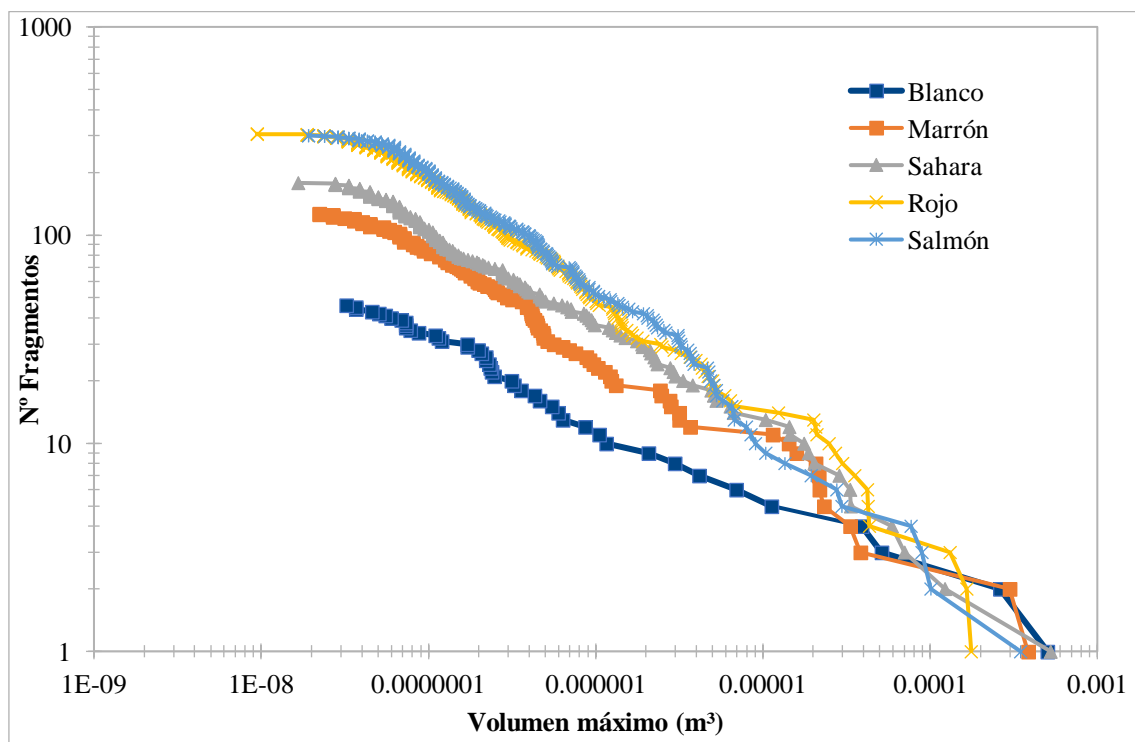
**Figura 127.** Ensayo de conminución n° 39



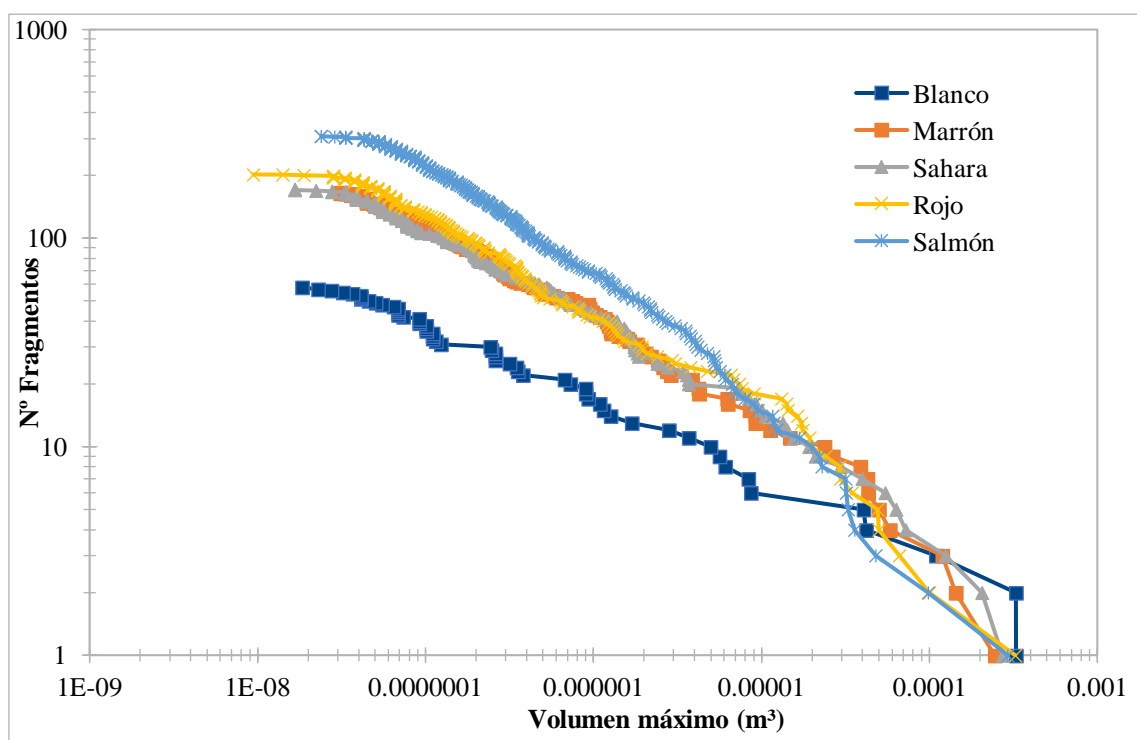
**Figura 128.** Ensayo de conminución n° 48



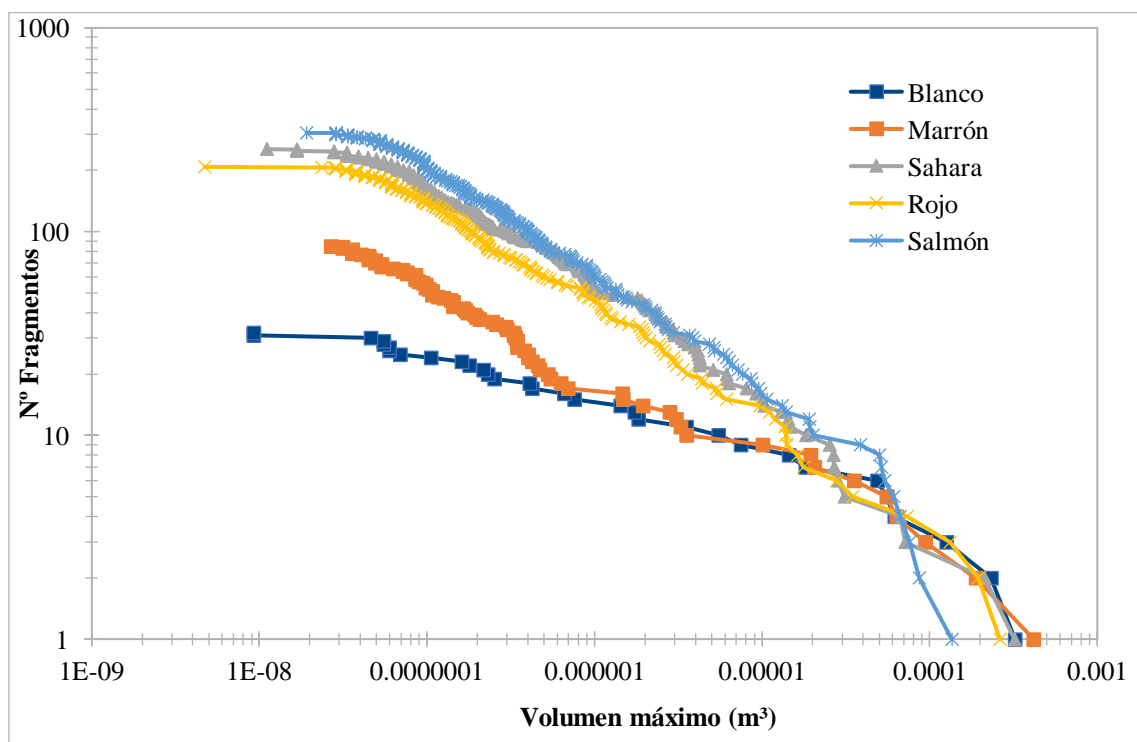
**Figura 129.** Ensayo de conminución nº 51



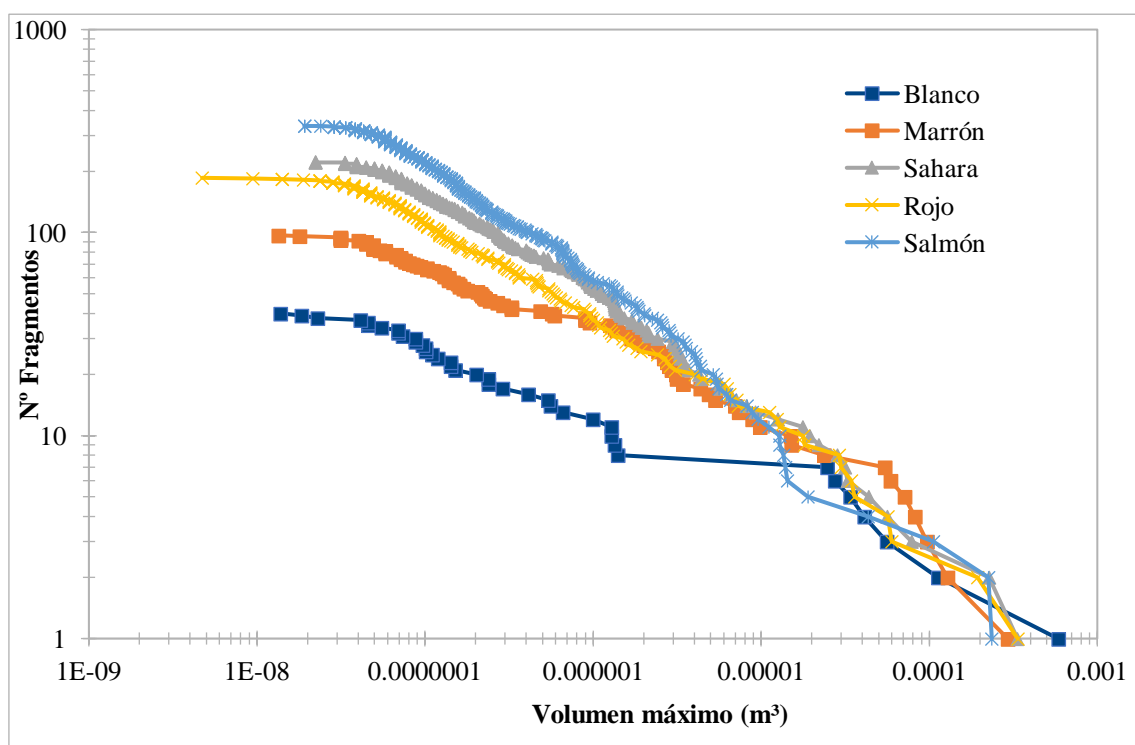
**Figura 130.** Ensayo de conminución nº 54



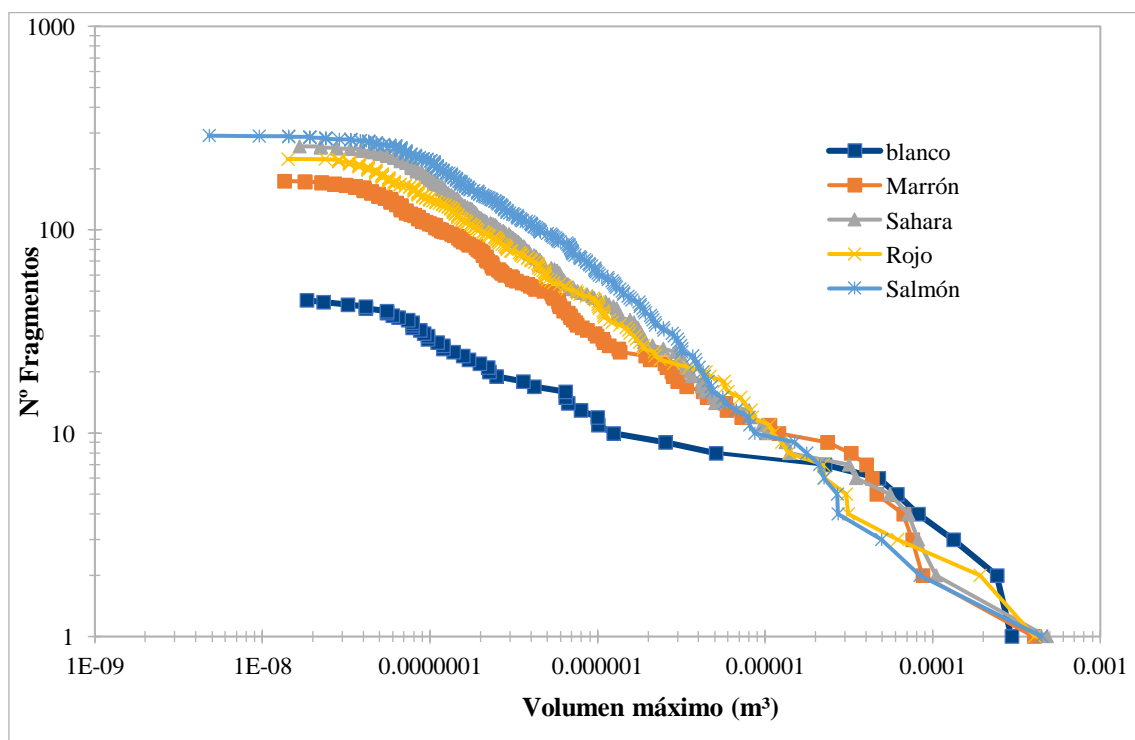
**Figura 131.** Ensayo de conminución nº 60



**Figura 132.** Ensayo de conminución nº 66

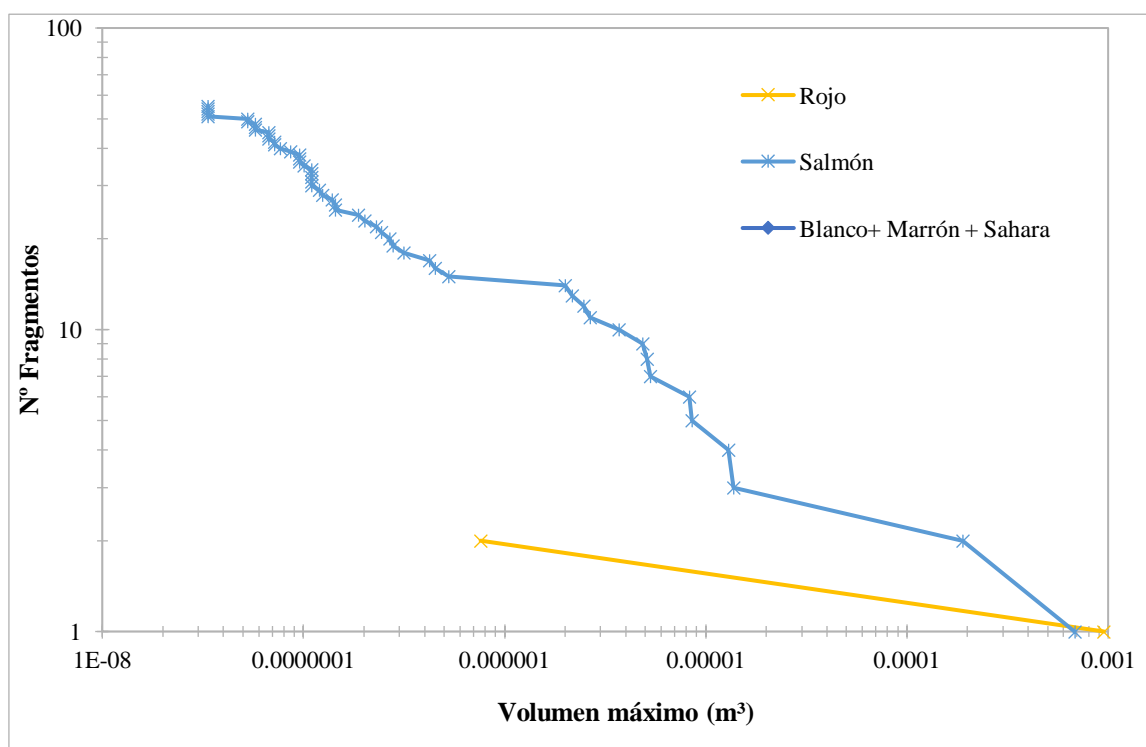


**Figura 133.** Ensayo de conminución nº 69

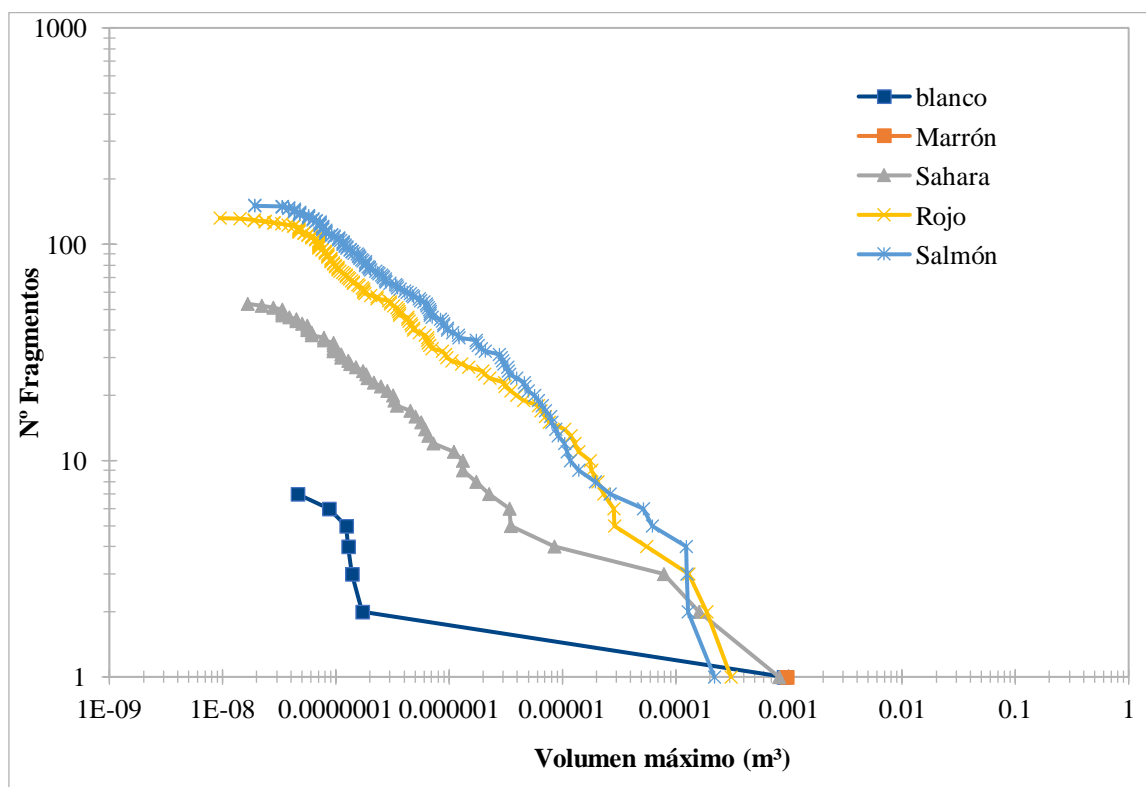


**Figura 134.** Ensayo de conminución nº 72

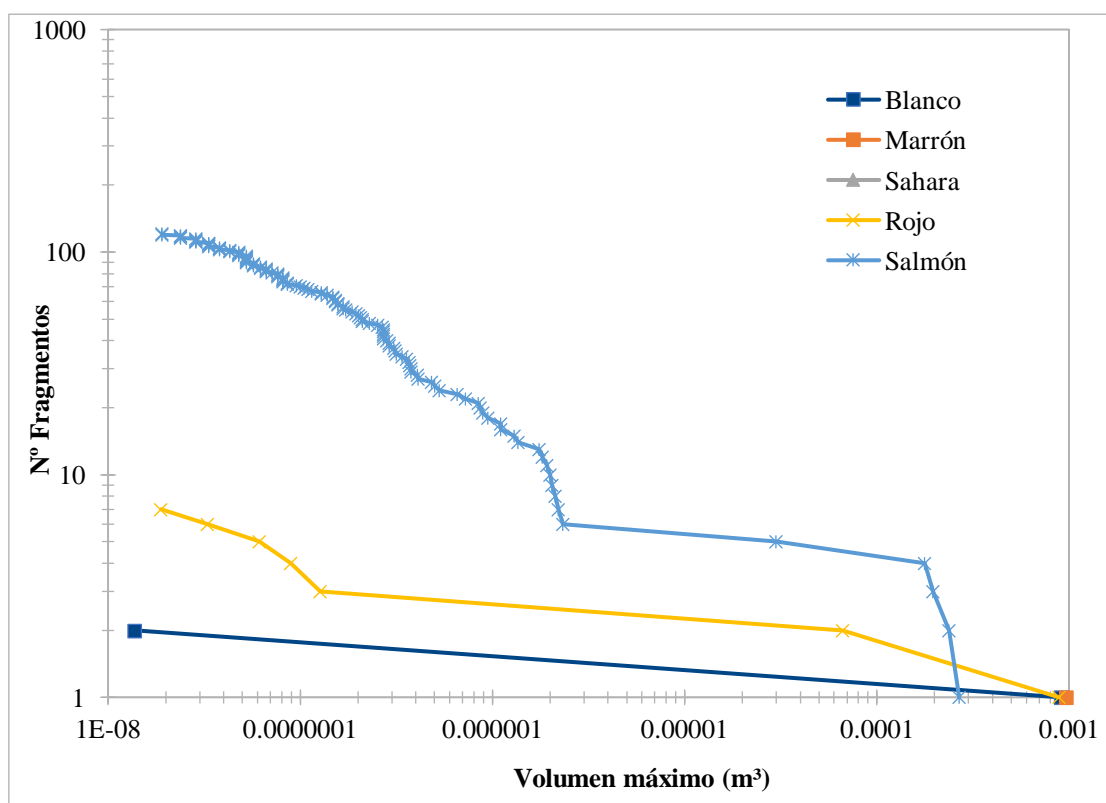




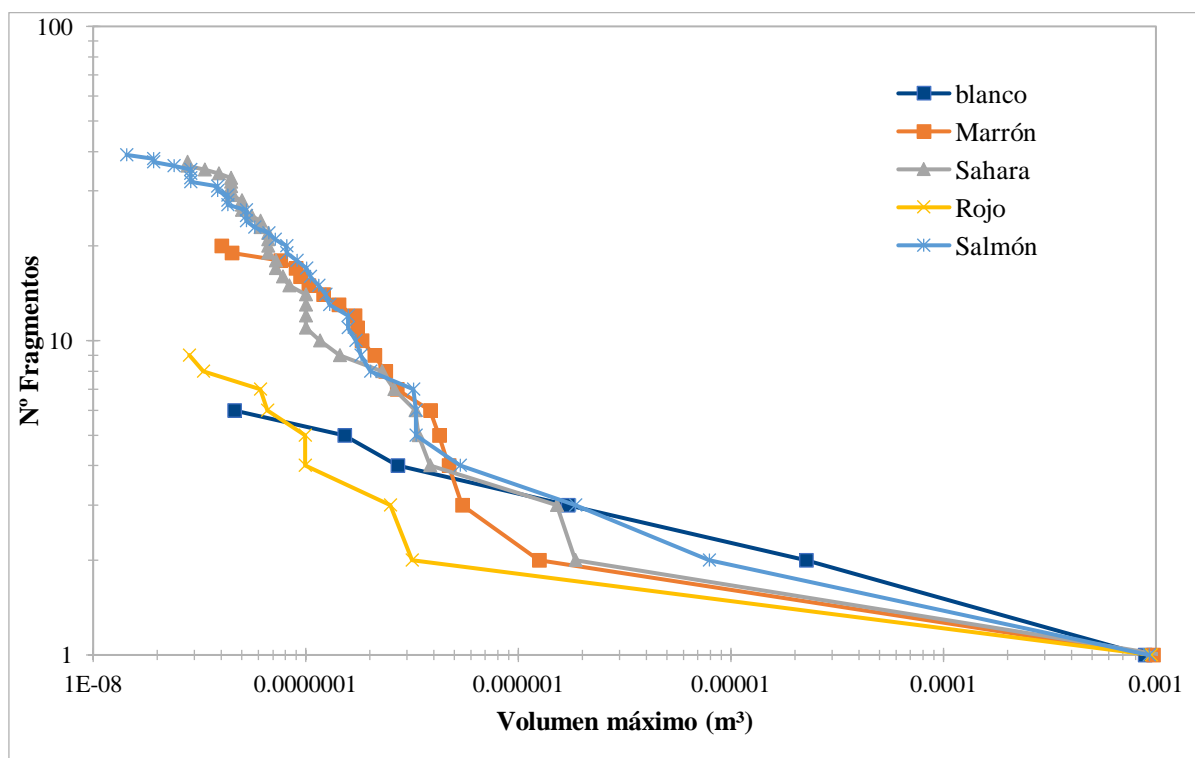
**Figura 135.** Ensayo de conminución nº 76



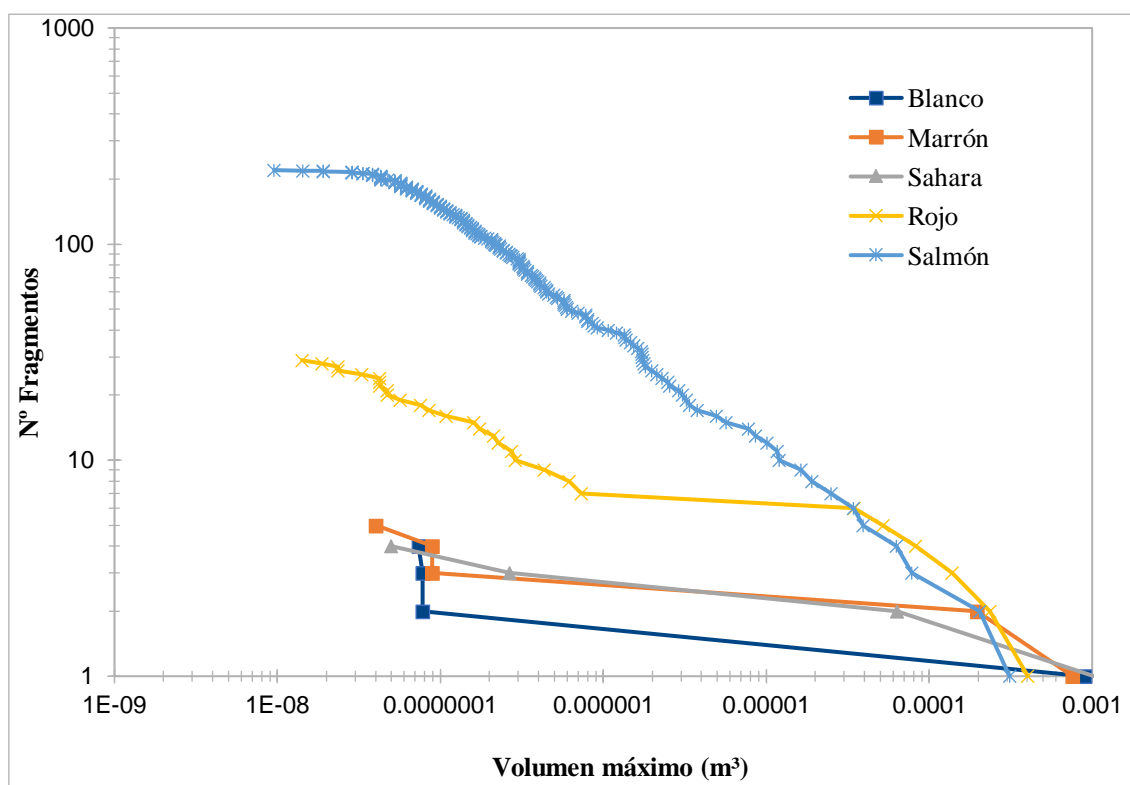
**Figura 136.** Ensayo de conminución nº 78



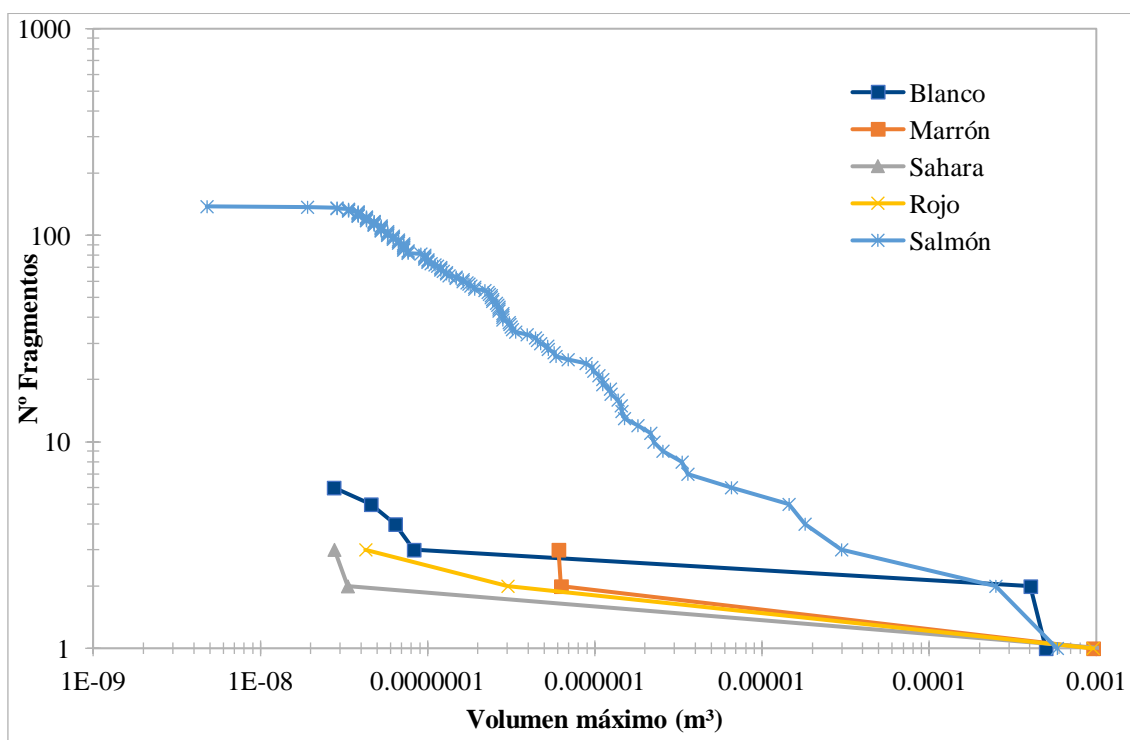
**Figura 137.** Ensayo de conminución nº 80



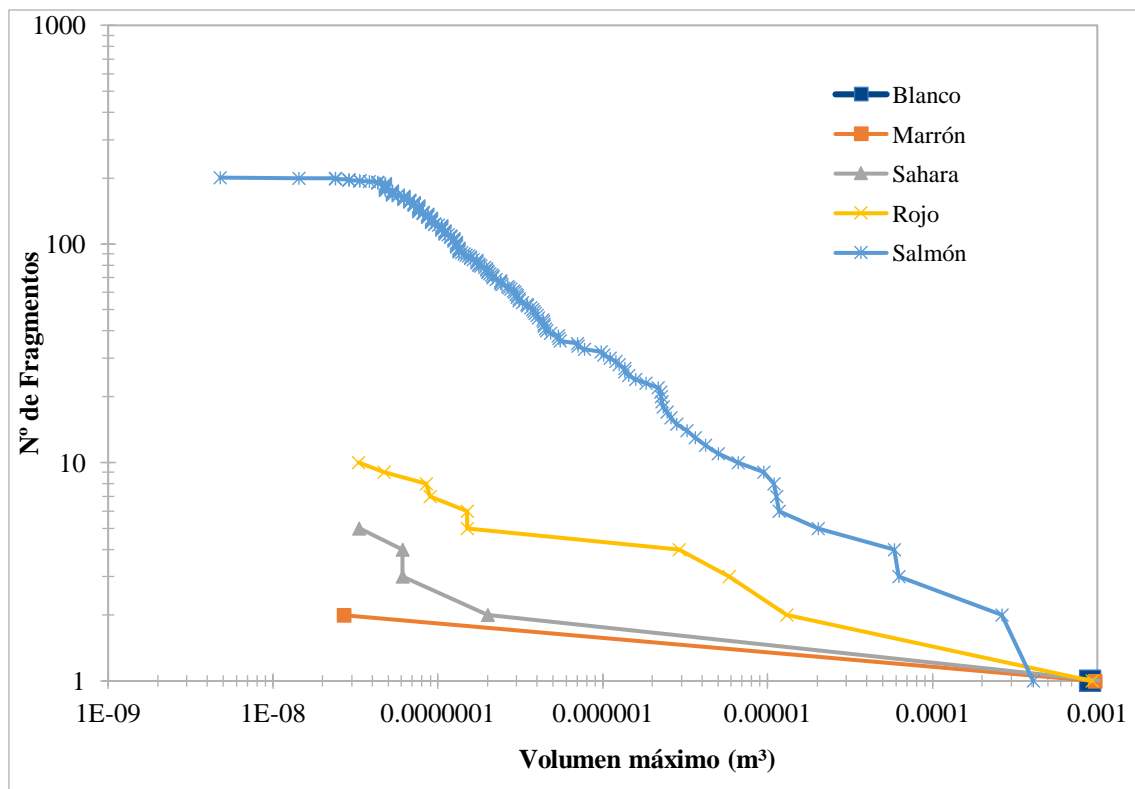
**Figura 138.** Ensayo de conminución nº 82



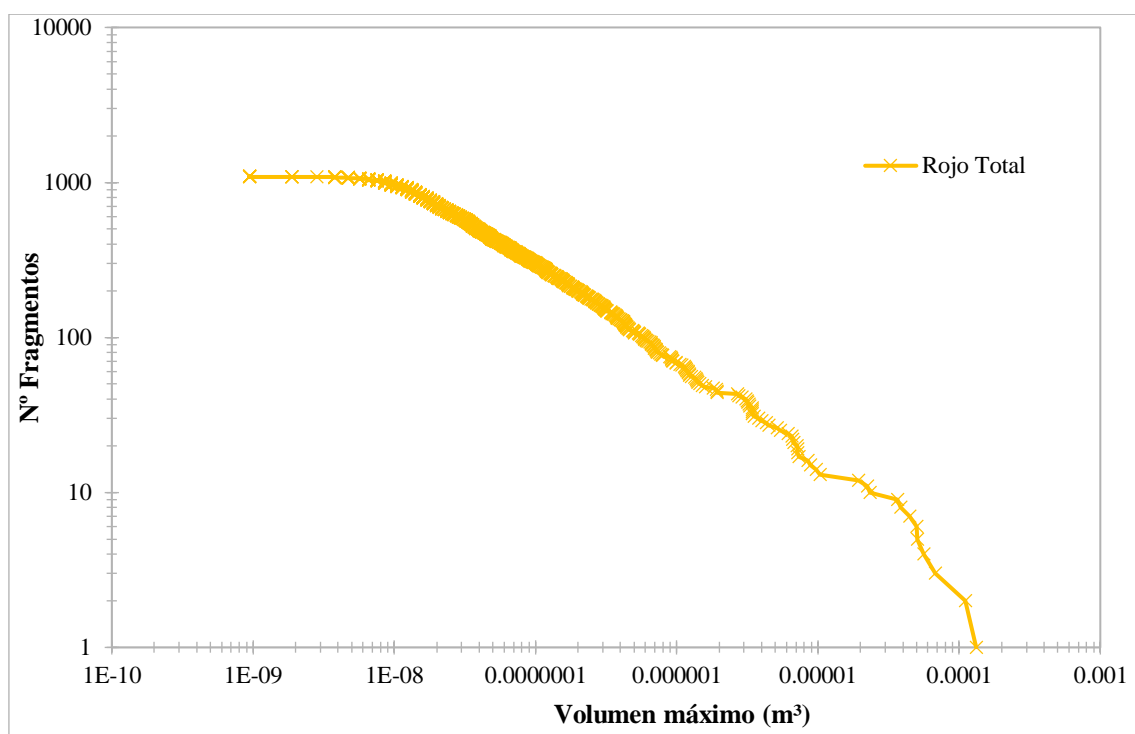
**Figura 139.** Ensayo de conminución n° 84



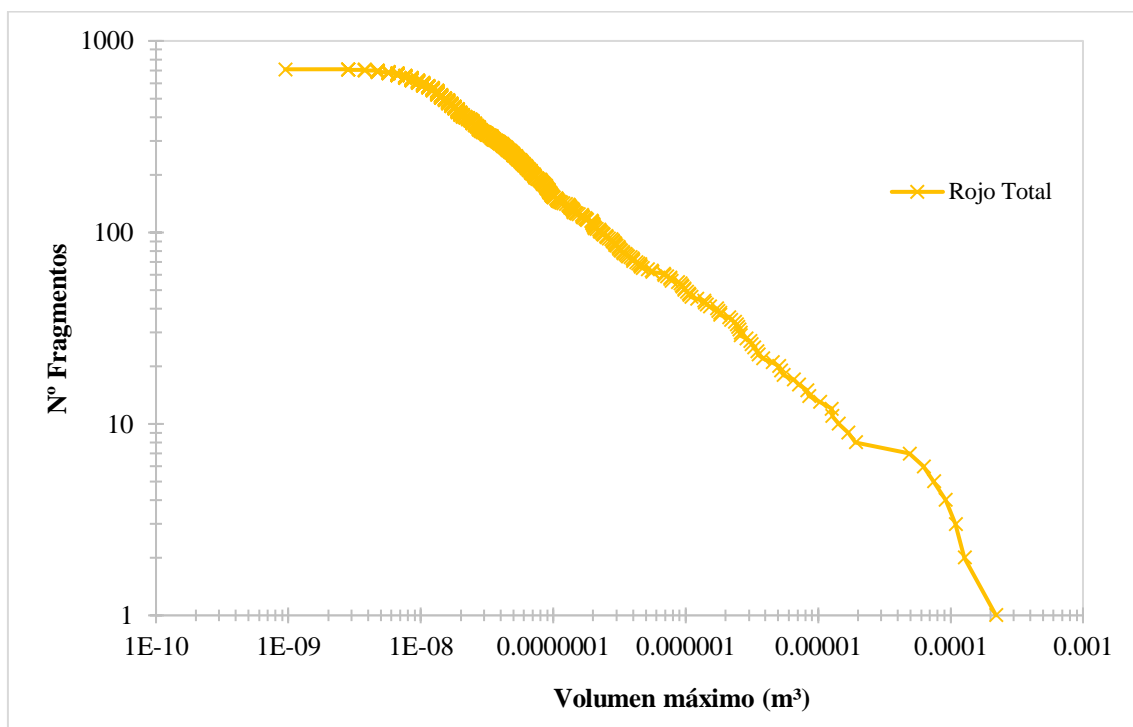
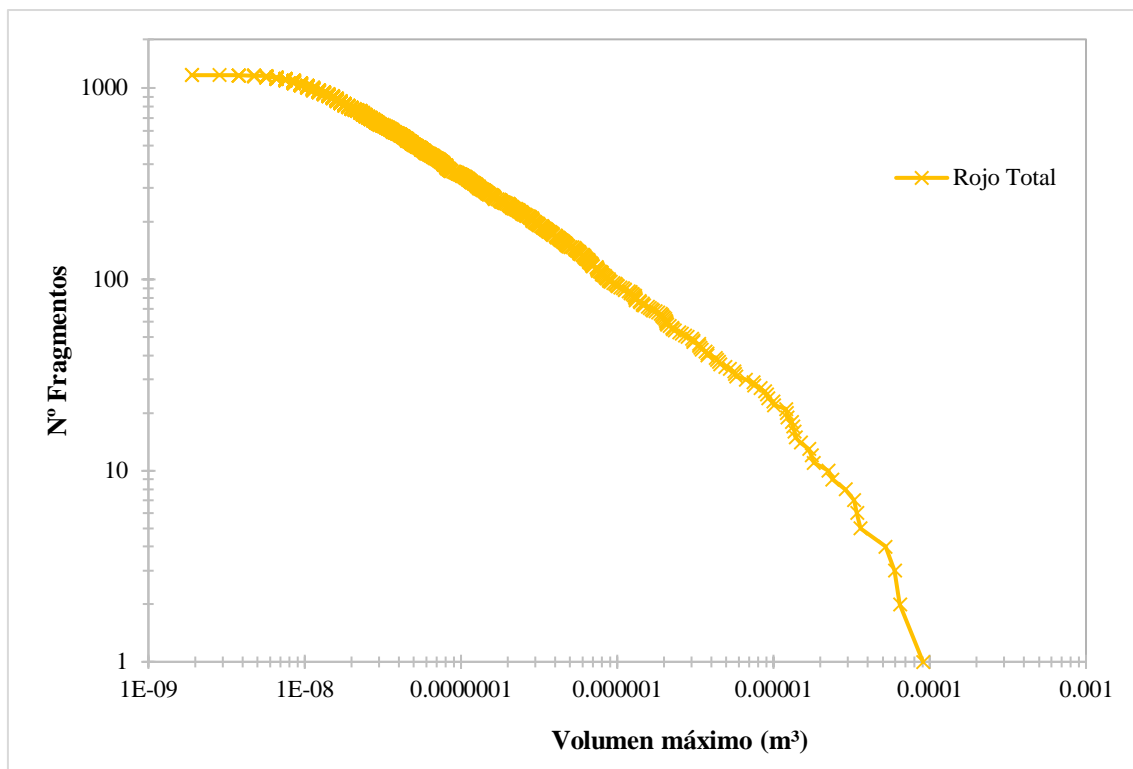
**Figura 140.** Ensayo de conminución n° 86



**Figura 141.** Ensayo de conminución nº 88



**Figura 142.** Ensayo de conminución nº 89



## A6. Tablas resumen de los resultados obtenidos.

### A6.1 Ensayos individuales.

Nº Ensayo	Tipo	Posición	Vmax (m³)	Nº Fragmentos	Color
37	1	2	0.00035885	143	Rojo
40	1	2	0.00056037	7	Rojo
43	1	2	0.00084093	35	Rojo
46	1	1	0.00033335	139	Salmón
49	1	1	0.0005071	14	Salmón
52	1	1	0.00035281	81	Salmón
55	1	3	0.00058608	132	Sahara
58	1	3	0.00069618	43	Sahara
61	1	3	0.00092628	95	Sahara
64	1	3	0.00035813	170	Sahara
67	1	1	0.00028638	91	Salmón
70	1	1	0.00037304	91	Salmón
73	1	1	0.00066662	65	Salmón
1	1	2	0.00063119	65	Rojo
4	1	2	0.00048743	22	Rojo
7	1	2	0.00018662	12	Rojo
10	1	2	0.00071314	83	Rojo
13	1	2	0.00052677	60	Rojo
16	1	2	0.00037018	34	Rojo
19	1	2	0.00048812	12	Rojo
22	1	2	0.00062708	43	Rojo
25	1	2	0.0002236	116	Rojo
28	1	2	0.00041522	106	Rojo
31	1	2	0.00095267	11	Rojo
34	1	2	0.00063191	15	Rojo



## A6.2 Ensayos de 3 muestras.

Nº Ensayo	Tipo	Posición	Vmax (m³)	Nº Fragmentos	Color
14	3	1	0.00029022	110	Salmón
14	3	2	0.00079424	47	Rojo
14	3	3	0.00091877	1	Sahara
17	3	1	0.00031383	152	Salmón
17	3	2	0.00027766	134	Rojo
17	3	3	0.00052735	72	Sahara
23	3	1	0.00042245	191	Salmón
23	3	2	0.00084111	38	Rojo
23	3	3	0.00106167	10	Sahara
26	3	1	0.00021702	243	Salmón
26	3	2	0.00029995	86	Rojo
26	3	3	0.00057758	41	Sahara
29	3	1	0.00065874	51	Salmón
29	3	2	0.00083379	42	Rojo
29	3	3	0.00091877	43	Sahara
32	3	1	0.00059805	132	Salmón
32	3	2	0.00080739	78	Rojo
32	3	3	0.0009363	56	Sahara
44	3	1	0.00037912	332	Salmón
44	3	2	0.00031566	115	Rojo
44	3	3	0.00059545	47	Sahara
47	3	1	0.00030712	310	Salmón
47	3	2	0.0004594	157	Rojo
47	3	3	0.00051381	100	Sahara
50	3	1	0.00035478	374	Salmón
50	3	2	0.00058602	91	Rojo
50	3	3	0.00055389	26	Sahara
56	3	1	0.00026106	304	Salmón
56	3	2	0.00020614	100	Rojo
56	3	3	0.00051903	48	Sahara
62	3	1	0.00014547	234	Salmón
62	3	2	0.00036325	90	Rojo
62	3	3	0.00079245	75	Sahara
68	3	1	0.0002679	239	Salmón
68	3	2	0.00035608	168	Rojo
68	3	3	0.00056082	58	Sahara
74	3	1	0.00046068	313	Salmón
74	3	2	0.00032723	119	Rojo
74	3	3	0.00048426	31	Sahara

79	3	1	0.00030819	160	Salmón
79	3	2	0.00050315	45	Rojo
79	3	3	0.0007245	8	Sahara
81	3	1	0.00032888	139	Salmón
81	3	2	0.00059624	7	Rojo
81	3	3	0.00068208	8	Sahara
83	3	1	0.00048228	68	Salmón
83	3	2	0.00044654	56	Rojo
83	3	3	0.00108099	1	Sahara
85	3	1	0.00031499	85	Salmón
85	3	2	0.0004197	43	Rojo
85	3	3	0.00045864	17	Sahara

### A6.3 Ensayos de 5 muestras.

Nº Ensayo	Tipo	Posición	Vmax (m³)	Nº Fragmentos	Color
6	5	1	0.00028937	116	Salmón
6	5	2	0.000508	145	Rojo
6	5	3	0.00061776	46	Sahara
6	5	4	0.0002974	51	Marrón
6	5	5	0.00090118	6	Blanco
9	5	1	0.00048775	225	Salmón
9	5	2	0.00059023	281	Rojo
9	5	3	0.00094712	64	Sahara
9	5	4	0.0009327	5	Marrón
9	5	5	0.0008655	6	Blanco
15	5	1	0.00030723	378	Salmón
15	5	2	0.00069443	119	Rojo
15	5	3	0.00094396	46	Sahara
15	5	4	0.00071193	9	Marrón
15	5	5	0.00090201	7	Blanco
24	5	1	0.00024987	303	Salmón
24	5	2	0.00044653	56	Rojo
24	5	3	0.00087896	65	Sahara
24	5	4	0.00092804	7	Marrón
24	5	5	0.00057004	10	Blanco
27	5	1	0.00057858	76	Salmón
27	5	2	0.00046496	63	Rojo
27	5	3	0.0005018	120	Sahara
27	5	4	0.00054016	10	Marrón
27	5	5	0.00044477	22	Blanco

33	5	1	0.00016106	156	Salmón
33	5	2	0.0002626	145	Rojo
33	5	3	0.00034572	103	Sahara
33	5	4	0.00026707	71	Marrón
33	5	5	0.00043212	14	Blanco
39	5	1	0.0002014	285	Salmón
39	5	2	0.00046827	225	Rojo
39	5	3	0.00037126	161	Sahara
39	5	4	0.00033308	99	Marrón
39	5	5	0.00030477	40	Blanco
48	5	1	0.00016548	242	Salmón
48	5	2	0.00018612	244	Rojo
48	5	3	0.00032479	301	Sahara
48	5	4	0.00033608	113	Marrón
48	5	5	0.00041171	43	Blanco
51	5	1	0.00022908	358	Salmón
51	5	2	0.0003385	266	Rojo
51	5	3	0.00037841	188	Sahara
51	5	4	0.00029426	223	Marrón
51	5	5	0.0004948	9	Blanco
54	5	1	0.00034712	301	Salmón
54	5	2	0.00017628	307	Rojo
54	5	3	0.00052565	178	Sahara
54	5	4	0.00038386	127	Marrón
54	5	5	0.00050394	46	Blanco
60	5	1	0.00029288	308	Salmón
60	5	2	0.00032462	202	Rojo
60	5	3	0.00027217	171	Sahara
60	5	4	0.00024495	165	Marrón
60	5	5	0.00032802	58	Blanco
66	5	1	0.00013518	305	Salmón
66	5	2	0.00026225	208	Rojo
66	5	3	0.00031992	254	Sahara
66	5	4	0.00041604	85	Marrón
66	5	5	0.0003222	32	Blanco
69	5	1	0.00023563	336	Salmón
69	5	2	0.00033579	186	Rojo
69	5	3	0.00033473	223	Sahara
69	5	4	0.00029244	97	Marrón
69	5	5	0.00058249	40	Blanco
72	5	1	0.00044572	290	Salmón
72	5	2	0.00040532	223	Rojo
72	5	3	0.00047813	257	Sahara

72	5	4	0.00039965	174	Marrón
72	5	5	0.00029436	45	Blanco
78	5	1	0.00021977	152	Salmón
78	5	2	0.00030805	132	Rojo
78	5	3	0.00081614	53	Sahara
78	5	4	0.00095089	1	Marrón
78	5	5	0.00089945	7	Blanco
80	5	1	0.00026845	121	Salmón
80	5	2	0.00088806	7	Rojo
80	5	3	0.00111198	1	Sahara
80	5	4	0.00096485	1	Marrón
80	5	5	0.00090734	2	Blanco
82	5	1	0.00092588	39	Salmón
82	5	2	0.00095039	9	Rojo
82	5	3	0.00108334	37	Sahara
82	5	4	0.00096564	20	Marrón
82	5	5	0.00088265	6	Blanco
84	5	1	0.00031135	220	Salmón
84	5	2	0.00040348	29	Rojo
84	5	3	0.00103007	4	Sahara
84	5	4	0.00076061	5	Marrón
84	5	5	0.00089847	4	Blanco
86	5	1	0.00058081	138	Salmón
86	5	2	0.00095567	3	Rojo
86	5	3	0.00111008	3	Sahara
86	5	4	0.00095572	3	Marrón
86	5	5	0.00049921	6	Blanco
88	5	1	0.00040843	201	Salmón
88	5	2	0.00092813	10	Rojo
88	5	3	0.00109119	5	Sahara
88	5	4	0.00095923	2	Marrón
88	5	5	0.00090373	1	Blanco

